

De morfologische ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks.



De morfologische ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks.

Auteur(s)

Edwin Elias

De morfologische ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks.

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	S. Pluis
Referenties	-
Trefwoorden	Zuidwest Texel, Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks, Morfologie

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	17-12-2021
Projectnummer	11206794-004
Document ID	
Pagina's	55
Status	definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	

Samenvatting

De kustlijn van zuidwest Texel is al decennia lang aan structurele kustlijnerosie onderhevig. Alleen met behulp van frequent terugkerende zandsuppleties kan hier de kustlijn behouden blijven. De voorliggende zandplaat, de Noorderlijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN), biedt een mogelijkheid om de kustlijn duurzamer - met meer gebruik van de natuurlijke processen - te handhaven. In de voorliggende rapportage wordt het morfologische gedrag van de NUN geanalyseerd en worden aanbevelingen gedaan voor toepasbare (systeem)suppletievarianten.

De NUN is een grote zandplaat die na afsluiting van de Zuiderzee aan de noordzijde van de Noorderhaaks is gevormd. De spitvormige uitbouw bereikte een maximale uitbouw rond 2000. In 2015 verheelt de noordelijke kop van de NUN met de kustlijn van zuidwest Texel. Er ontstond zo een ondiep platform met een hoogte van ongeveer NAP -5 m. Na 2000 vindt sediment accumulatie vooral plaats in een groot opbouwend ebschild (tussen raai 800 en 900), waardoor het noordelijke deel van de NUN niet langer behouden kan blijven en langzaam in hoogte en omvang afneemt. Het is waarschijnlijk dat het opbouwende ebschild in de toekomst, op een termijn van 10 jaar, een belangrijke rol gaat spelen in de kustlijn ontwikkeling. Door aanlanding van de bank zal de kust tijdelijk uitbouwen. Ook zijn in dit tijdsbestek grootschalige morfologische veranderingen van de banken (Noorderhaaks en NUN) en de geul Molengat te verwachten.

De erosie van de ondiepe kustzone van zuidwest Texel zal tot de aanlanding van het ebschild onverminderd doorgaan, waardoor ook in de nabije toekomst suppleties noodzakelijk zijn om de kustlijn te behouden. Voortzetting van de huidige suppletiestrategie door het uitvoeren van strandsuppleties is hierbij een optie, maar ook het uitvoeren van een systeemsuppletie in de vorm van een Zandmotor lijkt mogelijk. Het ondiepe platform, gelegen tussen raai 1000 en 1200, is voor zo'n suppletie een geschikte locatie. Deze suppletie zal zich kustlangs, in noordelijke en zuidelijke richting verspreiden, waardoor de kusterosie voor lange tijd kan worden gemitigeerd.

Inhoud

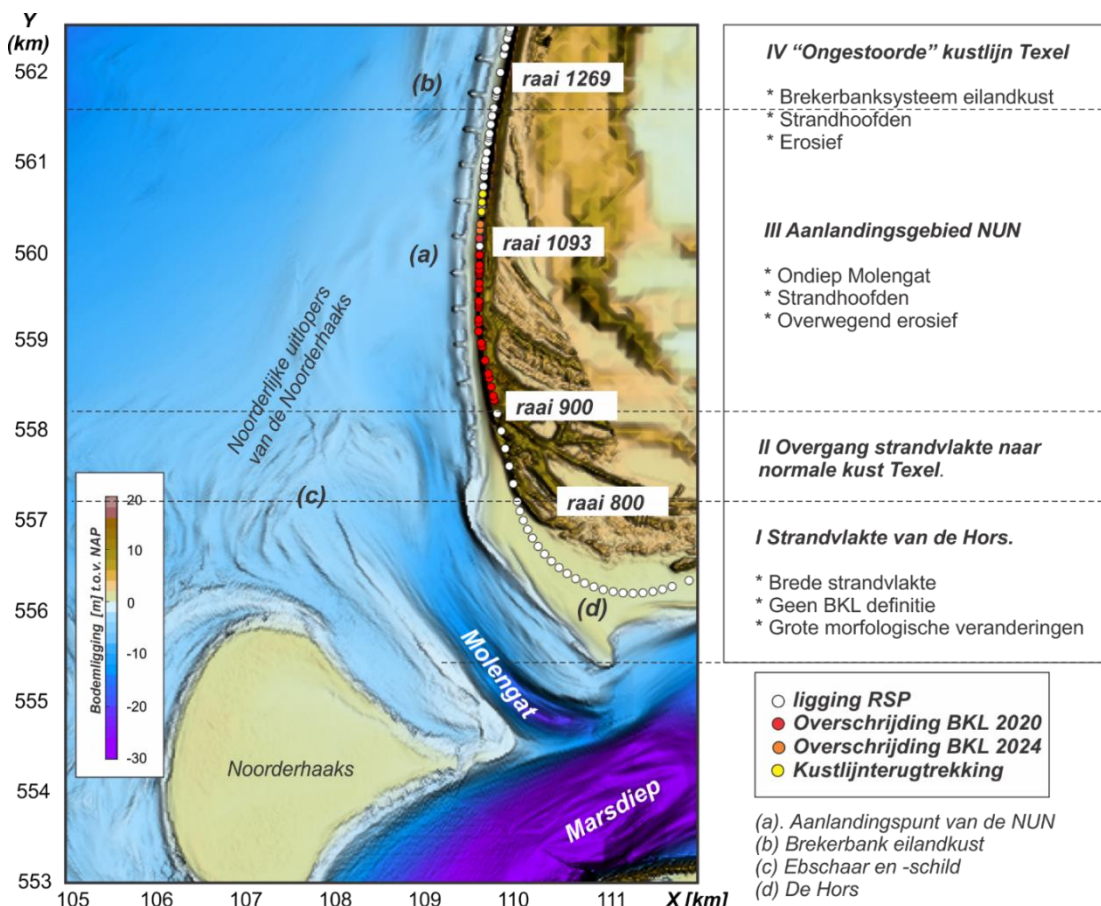
	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Doelstelling	6
1.2	Probleemstelling en doelstelling	7
1.3	Opbouw van het Onderzoek	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Grootschalige morfologische veranderingen	9
2.1	Het Zeegat van Texel rond 1926 (voor afsluiting van de Zuiderzee)	9
2.2	De morfologische veranderingen in respons op afsluiting van de Zuiderzee (1932-1975).	10
2.3	Stabiele geulen, erosie van de Noorderhaaks en groei van de NUN (1975-2001).	12
2.4	Vorming van de huidige buitendelta (2000-2021)	13
2.5	Samenvatting ontwikkeling van de noorderhaaks	15
3	Uitwisseling van NUN, Molengat en Texel	16
3.1	Het ontstaan van de NUN (1926-1971)	16
3.2	Groei van de NUN en verdieping Molegengat (1971-2000)	18
3.3	Aanlanding van de NUN en vorming van een ebschild (2000-2018)	20
4	Samenhang kustlijn en NUN.	22
4.1	Inleiding	22
4.2	Raai 700	23
4.3	Raai 840	24
4.4	Raai 900	25
4.5	Raai 1000	26
4.6	Raai 1108	27
4.7	Raai 1210	28
4.8	Invloed van suppleties op de MKL	29
5	Synthese	30
5.1	De NUN in relatie tot erosie van zuidwest Texel	30
5.2	Toekomstige ontwikkeling van de NUN	34
5.3	Mogelijke suppletie strategieën	35
6	Conclusies	38
7	Referenties	40
A	Aanvullende bodemkaarten	42
B	Overzicht van Jarkus grids	47
C	Aanvullende figuren synthese	52

1 Inleiding

1.1 Doelstelling

Het onderzoek in het programma Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Sinds 1990 is het kustbeheer gericht op dynamisch handhaven van de kustlijn (Rijkswaterstaat, 1990; Hillen & de Haan 1993; Hillen & Roelse, 1995; De Ruig, 1998). Met name het kustonderhoud van eilandkoppen kent extra uitdagingen door opdringende zandplaten en geulen.

In 2020 is onderzoek uitgevoerd naar het toepassen van systeemsuppleties langs de Nederlandse kust (Elias, 2020). Dit zijn zandsuppleties waarbij invloed wordt uitgeoefend op de natuurlijke hydraulische en morfologische processen om het systeemgedrag verandert. Doel is de kustlijn duurzamer, met meer gebruik van de natuurlijke processen, te handhaven. Uit de uitgevoerde analyses volgt dat de Noorderlijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) één van de kansrijke locaties is, waar zo'n suppletie toegepast kan worden (Figuur 1-1). Deze suppletie zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kust, waardoor de erosie die optreedt langs de kustlijn van zuidwest Texel reduceert. Ook heeft deze suppletie de potentie op termijn de kust voeden met sediment (Elias et al. 2021a,b). Voor uitvoering van deze suppletie is het essentieel het morfologische gedrag van de NUN voldoende te begrijpen.



Figuur 1-1: De bodem van Zuidwest Texel op basis van de 2019 Vakloding en JARKUS dataset en onderverdeling in 4 deelgebieden met karakteristiek morfologisch gedrag. De RSP-ligging en de resultaten van de 2019-toetsing van de kustlijn zijn weergegeven met de cirkels. Bron: Elias (2020).

1.2 Probleemstelling en doelstelling

Het zeegat van Texel en de zuidwest kust zijn al lange tijd aan erosie onderhevig. Decennia lang was het opdringen, dit is het landwaarts verplaatsen, van het Molengat een belangrijke reden van grote zandverliezen van de kust (Cleveringa, 2001). De studie van Elias en Van der Spek (2017) laat echter zien dat de processen onderliggend aan de erosie veranderd zijn. Het Molengat vertoont, in tegenstelling tot voorheen, geen landwaartse verplaatsing meer. Tussen raai 900 en 1100 is de aanvoer van zand door natuurlijke processen, waarschijnlijk ontoereikend om de afvoer van zand, door het getij en golven, te compenseren. Erosie van De Hors is nu gerelateerd aan het uitzakken van het geulprofiel en het opvullen van het Molengat (Elias en Van der Spek, 2020).

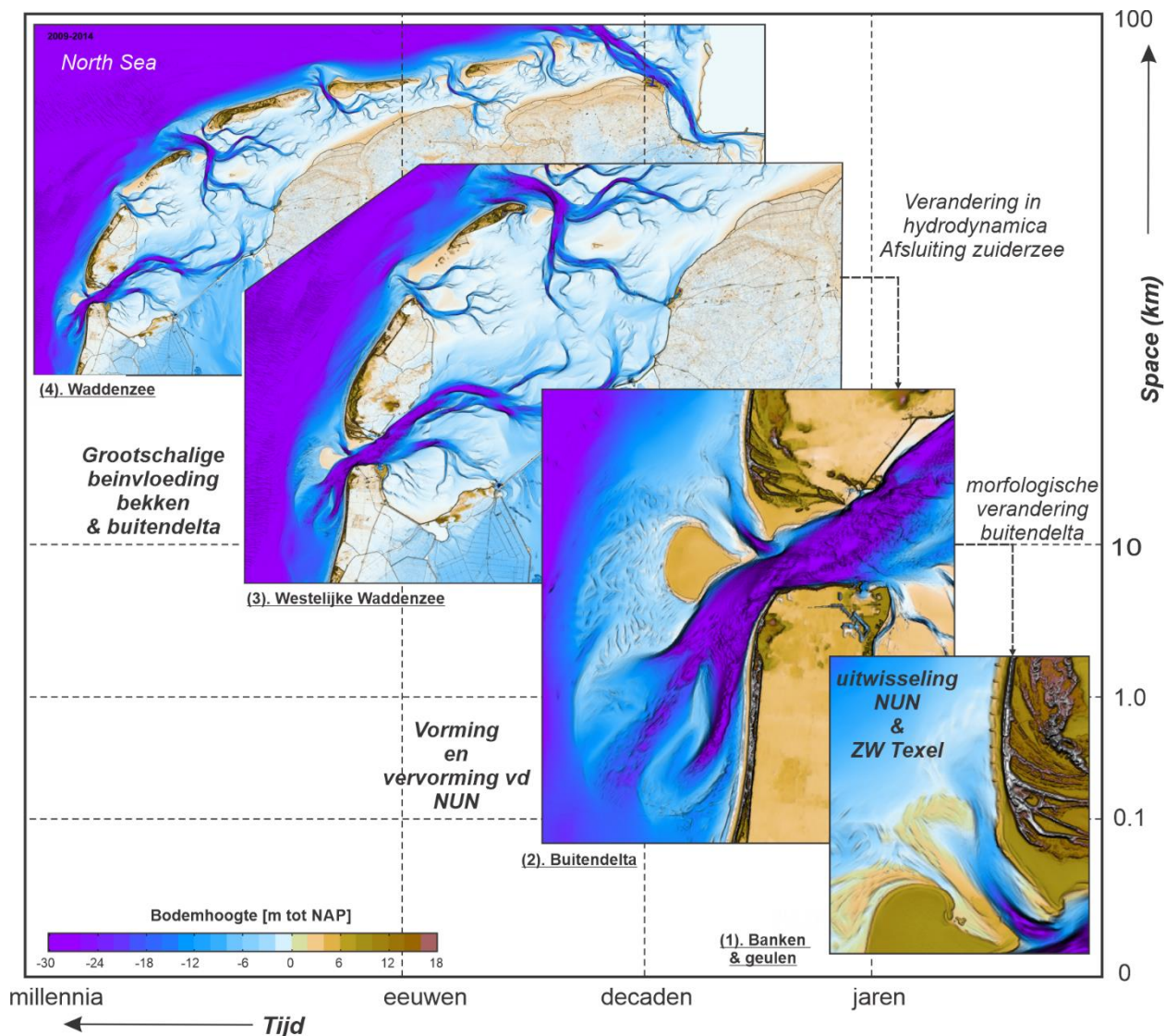
De rol van de NUN in de recente erosie problematiek is nog niet geheel duidelijk. De bodemdata laten wel zien dat er grote veranderingen optreden, maar de onderliggende processen en eventuele gevolgen voor de kust van zuidwest Texel zijn vooralsnog onduidelijk. Het doel van het in deze rapportage gepresenteerde onderzoek is meer inzicht te verkrijgen in het morfologische gedrag van de NUN en de uitwisseling tussen de NUN en de kust van zuidwest Texel. Daarnaast worden aanbevelingen gegeven of, en in welke vorm, systeemsuppleties kunnen bijdragen aan de kustlijnhandhaving van zuidwest Texel als vervolg op de studies van Elias (2020) en Elias et al. (2021a,b).

1.3 Opbouw van het Onderzoek

De NUN vormt onderdeel van het zeegatsysteem van Texel. De morfologische veranderingen van de NUN worden dan ook mede gestuurd door de grootschalige veranderingen die in het zeegatsysteem optreden. In zeegatsystemen worden de morfologische veranderingen gedreven door processen die over verschillende tijd- en ruimteschalen spelen. Het beschrijven van deze veranderingen vergt een gestructureerde aanpak, waarvoor ook in deze studie het schaalcascade concept toegepast wordt (Figuur 1-2)

De doelstelling van de voorliggende rapportage is de uitwisseling tussen de NUN en de zuidwestkust van Texel beter te begrijpen. Deze uitwisseling speelt op **schaal 1**, de individuele banken en geulen. Voor zuidwest Texel zijn de NUN, de tussenliggende geul Molengat en de vervorming van de Noorderhaaks direct van belang. De vorming van de NUN en de huidige vervorming wordt gestuurd door processen die spelen op de schaal van de buitendelta (**schaal 2**). Van direct belang zijn de grote getijstromingen die zich door het zeegat en ook door het Molengat heen en weer bewegen. Daarnaast spelen de ondieptes van de Noorderhaaks een belangrijke rol. Deze ondieptes beïnvloeden de golven en het kustlangse Noordzeegetij. Daarnaast vormt erosie van de Noorderhaaks een belangrijke bron van zand voor de NUN. Grootschalige veranderingen van de Noorderhaaks zijn in gang gezet met de afsluiting van de Zuiderzee in 1932 (**schaal 3**). Na afsluiting hebben de veranderingen in hydrodynamica morfologische veranderingen in gang gezet die decennia lang de buitendelta hebben gedomineerd. Ook nu, bijna 90 jaar na afsluiting, speelt aanpassing van de buitendelta nog steeds een rol.

De afsluiting van de Zuiderzee heeft grootschalig het systeem zodanig veranderd dat de processen die speelden voor afsluiting fundamenteel zijn veranderd. Zo is het getij toegenomen en is het bekken van vorm en omvang veranderd. Veranderingen die spelen op **schaal 4** worden in dit onderzoek dan ook niet meegenomen. Voor een beschrijving van de historische veranderingen van het zeegat en de kust van Texel wordt verwezen naar Schoorl (1973, 1999), Elias en van der Spek (2006) en Van Heteren et al. (2006).



Figuur 1-2: Een schaalcascade voor het beter begrijpen van de uitwisseling tussen de NUN en zuidwest Texel.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit 6 Hoofdstukken. Na deze inleiding wordt in Hoofdstuk 2 een beknopt overzicht gegeven van de ontwikkeling van de buitendelta van het zeegat van Texel sinds afsluiting van de Zuiderzee. In Hoofdstuk 3 worden de NUN, het Molengat en de uitwisseling met zuidwest Texel in detail beschreven. Deze twee hoofdstukken zijn gebaseerd op de (3-jaarlijkse) vaklodingen. In Hoofdstuk 4 wordt een verdiepingsslag van het kustgedrag uitgevoerd. Door analyse van de JARKUS-data wordt de samenhang tussen kustlijn en de NUN beschreven. Hoofdstuk 5 geeft een synthese van de studie. In dit hoofdstuk wordt een beschouwing gegeven van de maatgeven processen, een vooruitblik naar de toekomst gegeven en er wordt een afweging gemaakt van mogelijke (systeem)suppletievarianten die hier toegepast kunnen worden. Conclusies en aanbevelingen worden gepresenteerd in Hoofdstuk 6.

2 Grootschalige morfologische veranderingen

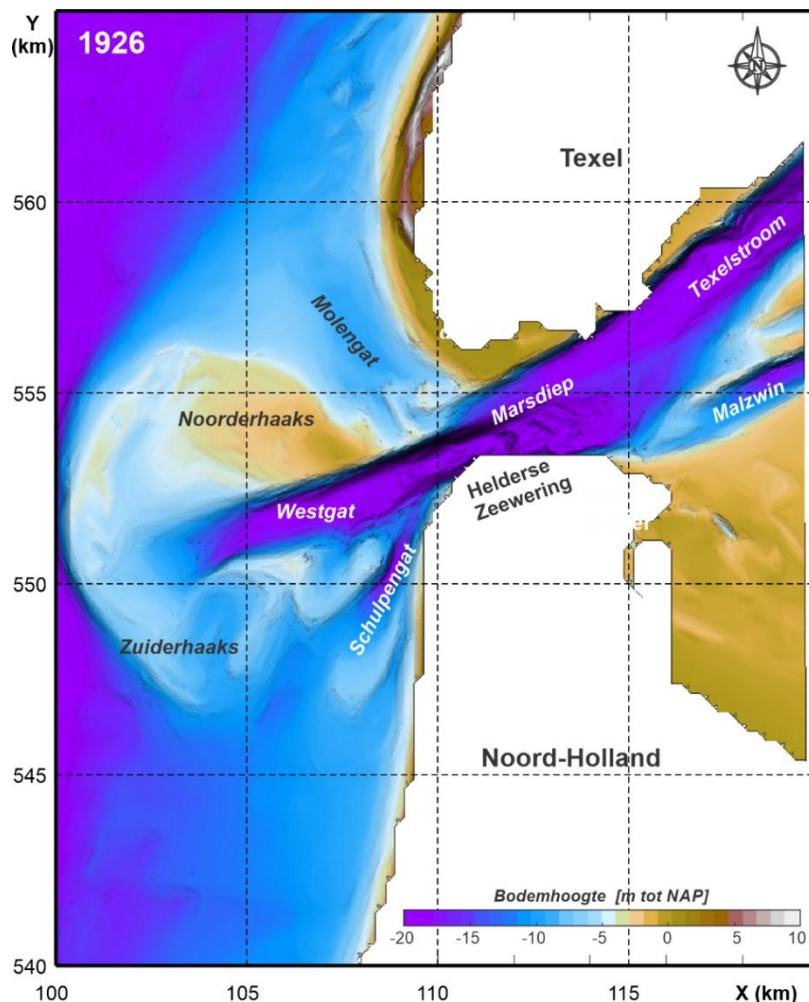
De Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) zijn onderdeel van de buitendelta van het Zeegat van Texel. De vorming van de NUN wordt gestuurd door de veranderingen in het zeegat. In dit hoofdstuk wordt een beknopte samenvatting van de belangrijkste kenmerken en morfologische veranderingen van het zeegat en de buitendelta gegeven. De focus ligt hierbij op de vorming van de NUN. Hierbij wordt kort de morfologie van de buitendelta voor afsluiting behandeld (H.2.1.1), de initiële morfologische respons van de buitendelta op de afsluiting (H. 2.1.2 en H. 2.1.3) en het huidige gedrag (H. 2.1.4).

2.1 Het Zeegat van Texel rond 1926 (voor afsluiting van de Zuiderzee)

Analyse van historische data laat zien dat het Zeegat van Texel waarschijnlijk al aanwezig was als een riviertje of een zeearm in de 8^e eeuw (Schoorl, 1973). Door kusterosie en erosie in het kombergingsgebied werd rond de 12de eeuw een doorbraak gevormd naar het Aelmeer waarop de Zuiderzee werd geopend en het zeegat snel in grootte toenam (Oost et al., 2019). Zuidelijke migratie van het zeegat tussen 1600 en 1750, zo'n 1500 meter, veroorzaakte veel erosieproblemen aan de kop van Noord-Holland. Al in het begin van de 17^{de} eeuw werden oeverbeschermingen in de vorm van houten paalrijen en bezinkstukken van wilgentenen aangebracht (Schoorl, 1973). Door aanleg van de Helderse Zeewering in het midden van de 18^{de} eeuw werd de zuidwaartse verplaatsing permanent gestopt en ontstaan de contouren van het huidige zeegat. De buitendelta wordt in de 19^{de} en begin 20^{ste} eeuw gekenmerkt door een stabiel geulen- en platensysteem (Elias en van der Spek, 2006). Er ontwikkelt zich een hoofdgeul met een westzuidwestelijke oriëntatie met aan weerszijden van die geul grote zandbanken; de Noorderhaaks en de Zuiderhaaks (Figuur 2-1 en Appendix A, Figuur A-1).

Figuur 2-1 geeft een goed beeld van de bodemligging van de buitendelta en de keel van het Zeegat van Texel rond 1926, net voor afsluiting van de Zuiderzee. De keel van het zeegat, ingesloten door het eiland Texel en de kop van Noord-Holland, heeft een minimale breedte van zo'n 2,5 km. In de keel ligt de geul Marsdiep. Het getijprisma, de gemiddelde hoeveelheid water die door het zeegat stroomt, is circa $1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ met maximale eb- en vloedsnelheden tussen de 1 en 2 m/s. Een belangrijk onderdeel in de keel van het zeegat is de Helderse Zeewering. Deze zeewering stabiliseert de zuidelijke oever, de kop van Noord-Holland. Ten zuiden van de Helderse zeewering wordt de kust verder beschermd door strandhoofden.

In de keel van het zeegat bevindt zich de hoofdgeul Marsdiep die verbinding maakt met de geulen Texelstroom en Malzwin in het bekken. Het Westgat vormt de uitstroombgeul van Marsdiep de buitendelta op en is westzuidwestelijk gericht. Het Schulpengat is dan nog een kleinere vloedgeul die zich langs de kust van Noord-Holland uitstrekt. Een groot platenoppervlak Noorderhaaks bevindt zich aan de noordzijde van het Westgat. Een breed maar ondiep Molengat vormt de scheiding tussen de Noorderhaaks en de kust van Texel. De ondiepe drempel die als scheiding tussen het Molengat en het Marsdiep ligt wijst erop dat het Molengat een vloedgedomineerde geul is. De NUN is dan nog niet gevormd.



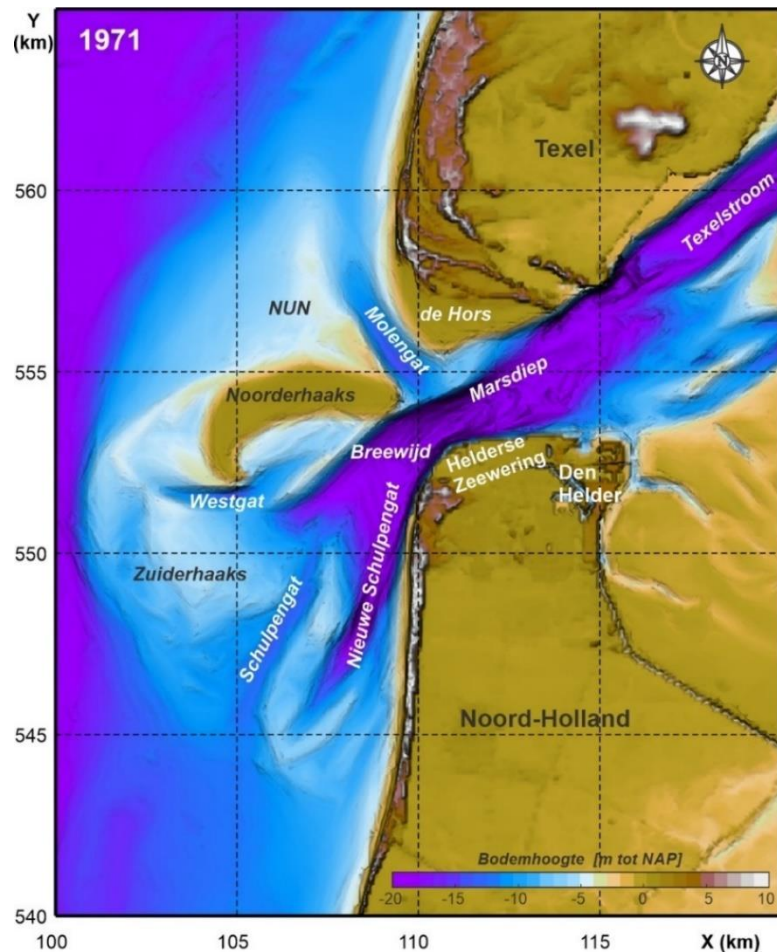
Figuur 2-1: Overzicht van de belangrijkste platen en geulen in het Zeegat van Texel rond 1926 (bodem gebaseerd op de 1926-1932 Vaklodingen).

2.2 De morfologische veranderingen in respons op afsluiting van de Zuiderzee (1932-1975).

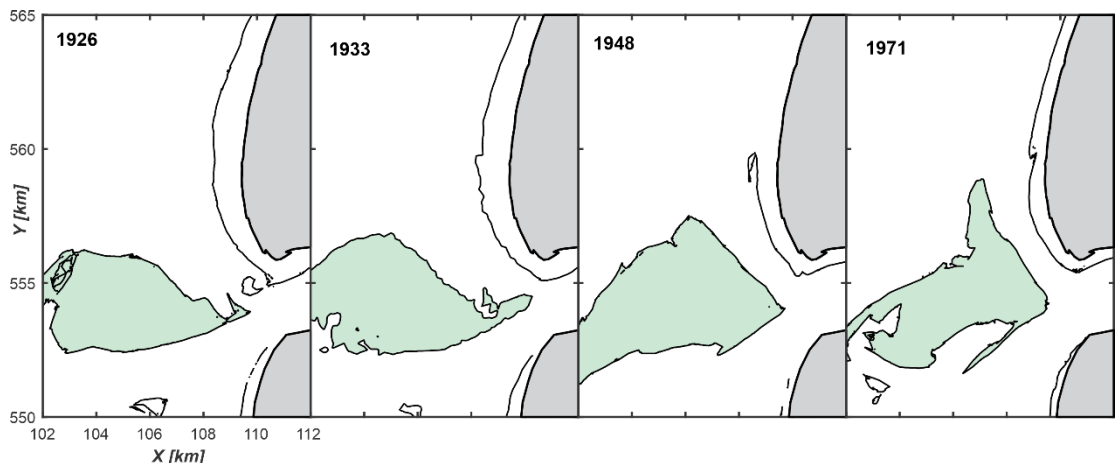
De afsluiting van de Zuiderzee (1925 - 1932) is van grote invloed geweest op de ligging van geulen en platen op de buitendelta van het zeegat van Texel (Elias et al., 2003). In de periode volgend op de afsluiting van de Zuiderzee, tot ongeveer 1975, was de ontwikkeling van Nieuwe Schulpengat en Schulpengat langs de Noord-Hollandse kust maatgevend (Elias en van der Spek, 2017). Het Schulpengat ontwikkelde zich hierdoor tot hoofdgeul op de buitendelta, terwijl de voormalige westelijk gerichte hoofdgeul (Westgat) verzandde. Rond 1956 splitste het Schulpengat zich op in het huidige twee-geulen systeem bestaand uit het Schulpengat en Nieuwe Schulpengat (Appendix A, Figuur A-2). Sinds 1975 is deze tweegeulen configuratie vrijwel stabiel aanwezig op de buitendelta (Figuur 2-2). Grote stroomsnelheden en versnelling van de stroming om de noordwestelijke punt van de Helderse Zeewering hebben het Marsdiep hier lokaal tot dieptes van meer dan 50 m uitgeschuurd.

Vóór afsluiting van de Zuiderzee strekt de buitendelta zich ongeveer 10 km zeewaarts en 20 km kustlans uit. In het centrum van de buitendelta bevindt zich een groot, ondiep gedeelte de Noorderhaaks; een gebied waarin de zeewaartse zandaanvoer door het Westgat in dynamisch evenwicht was met het landwaarts zandtransport door golven. Met het verzanden van de voormalige hoofdgeul Westgat reduceerde ook de zandtoevoer vanuit het bekken naar de Noorderhaaks, waardoor het landwaarts transport door golven dominant hier werd. De Noorderhaaks migreerde

landwaarts, nam toe in hoogte en vervormde. De Razende Bol, de oostzijde van de Noorderhaaks, verschoof sinds zijn droogvallen in de jaren '50 al langzaam naar het oosten toe. Aan de noordzijde ontstaat een langgerekte zandbank, de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) (Figuur 2-3). Deze bank is ook in de bodem van 1971 (Figuur 2-2) al duidelijk terug te zien. Het landwaarts verplaatsen van de rand van de buitendelta na beïnvloeding van een zeegat is geen unieke respons. Ook na afsluiting van de Grevelingen, het Haringvliet en bij de afsluiting van de Lauwerszee werd een soortgelijke verplaatsing geobserveerd (Van der Spek en Elias, 2021; Elias en Oost, 2021).



Figuur 2-2: Overzicht van de belangrijkste platen en geulen in het Zeegat van Texel rond 1971; na de initiële respons op afsluiting van de Zuiderzee.

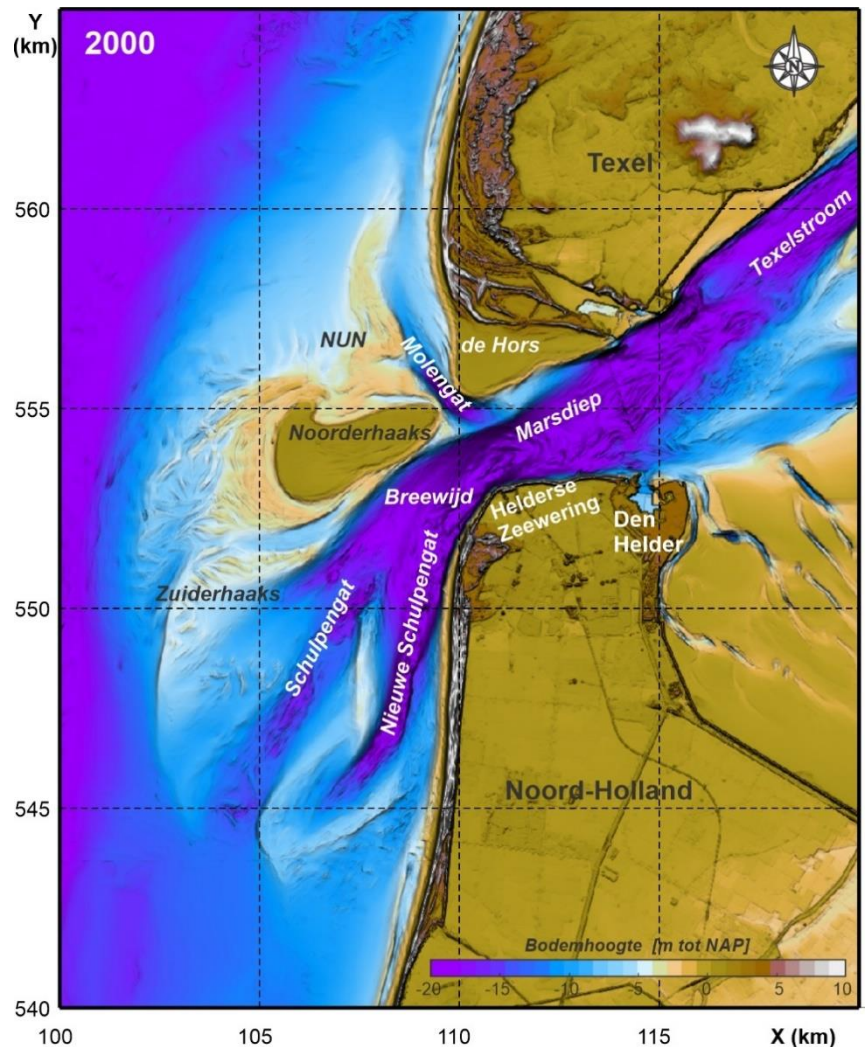


Figuur 2-3: Ontwikkeling van de Noorderhaaks en NUN over de periode 1926-1971. De zwarte lijnen geven de -5m contourlijn weer. De Noorderhaaks en NUN zijn groen ingekleurd.

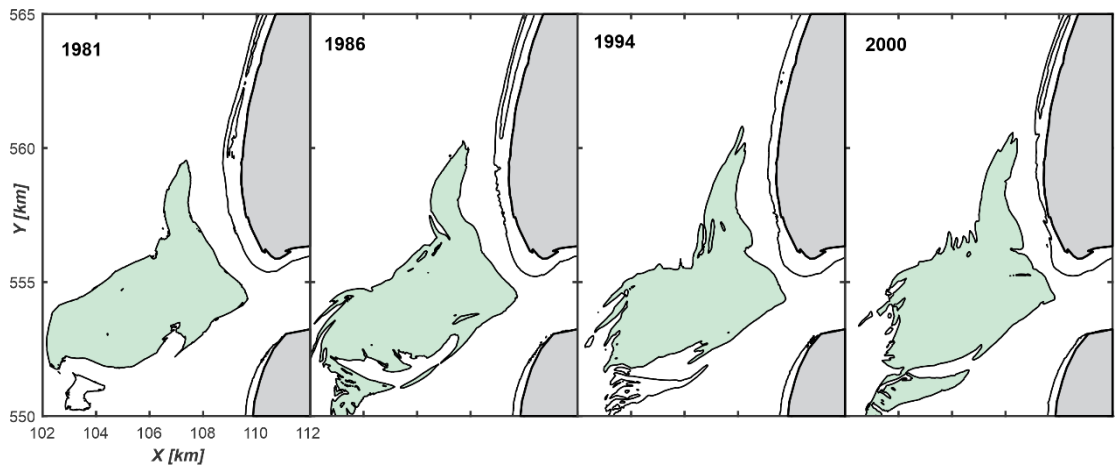
2.3 Stabiele geulen, erosie van de Noorderhaaks en groei van de NUN (1975-2001).

Ook na de initiële aanpassing van de geulen treedt er nog een langdurige periode van grote erosie en verandering van de platen op (Elias en Van der Spek, 2017). In deze periode bouwt de NUN zich sterk uit en bepaalt de geul Molengat in grote mate de ontwikkeling van de achterliggende kustlijn van Texel en De Hors.

Op basis van de -5m contourlijn kan geconcludeerd worden dat de NUN rond 1995 een maximale noordelijke uitbouw bereikt (Figuur 2-3 en Appendix A, Figuur A-3 en Figuur A-4). Sindsdien verplaatst de punt van de NUN landwaarts. De groei en landwaartse verplaatsing van de NUN zorgt ervoor dat de breedte van het Molengat verkleint, waardoor de geul dieper wordt. Ook verplaatst de geul richting de kust. In de periode tot 2001 is deze verdieping en verplaatsing één van de belangrijkste oorzaken van de structurele erosie die langs de aanliggende kust is opgetreden (Cleveringa, 2001). Na een initiële sterke groei en kromming van de NUN was het de verwachting dat deze spit zich snel met de kust van Texel zou verhelen. Deze verheling bleef echter lange tijd uit. Vooral gedurende de periode 1991-2006 bleef de geul-plaat configuratie nagenoeg stabiel (Figuur 2-5 en Figuur 2-7). De 2000 bodemkaart vertoont een goed beeld van deze configuratie. Een langgerekte NUN is zichtbaar met een diep Molengat (Figuur 2-4).



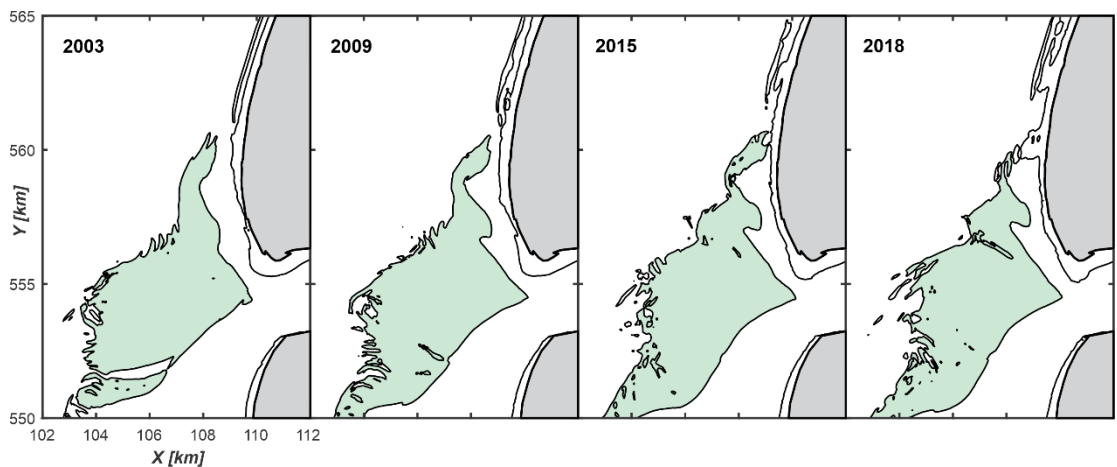
Figuur 2-4: Overzicht van de belangrijkste platen en geulen in het Zeegat van Texel rond 2000; na de initiële respons op afsluiting van de Zuiderzee.



Figuur 2-5: Ontwikkeling van de Noorderhaaks en NUN over de periode 1981-2000. De zwarte lijnen geven de -5m contourlijn weer. De Noorderhaaks en NUN zijn groen ingekleurd.

2.4 Vorming van de huidige buitendelta (2000-2021)

Op basis van de volumeveranderingen van de gehele buitendelta concluderen Elias en van der Spek (2017), dat er een verandering in het morfologische gedrag plaatsvindt rond 2000. De erosie van de totale buitendelta neemt dan significant af. Deze afname treedt vooral op in het deel ten zuiden van de Noorderhaaks. Ten noorden van de Noorderhaaks treedt de verandering in gedrag iets later op. Vanaf 2006 is zichtbaar dat de noordpunt van de NUN landwaarts verplaatst. In de 2012 opname is het noordelijk gedeelte van het Molengat opgevuld door de landwaartse migratie van het noordelijk gedeelte van de NUN. De noordelijke punt van de NUN is dan vastgegroeid aan de kust en vormt een ondiep platform op een diepte van ongeveer -5 m NAP (Figuur 2-6 en Figuur A- 5).

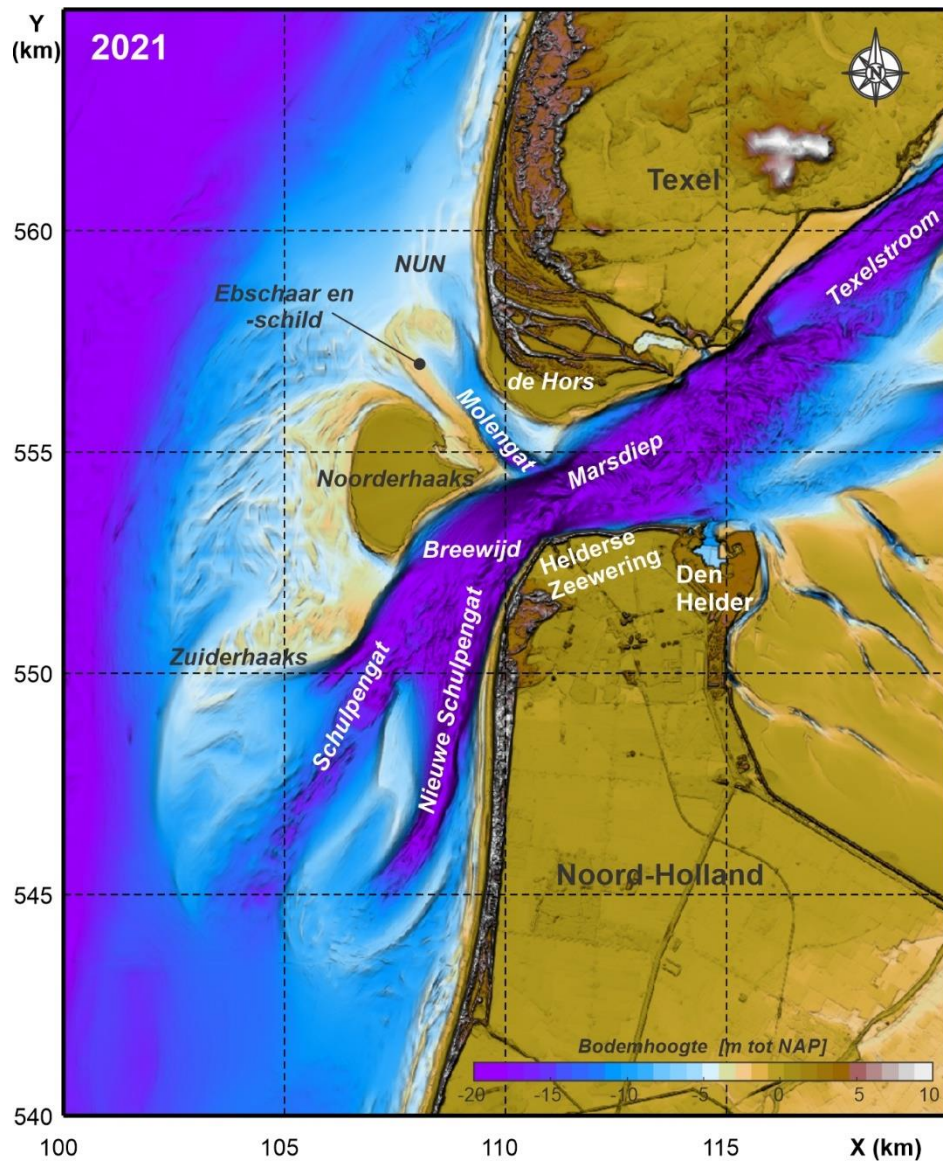


Figuur 2-6: Ontwikkeling van de Noorderhaaks en NUN over de periode 2003-2018. De zwarte lijnen geven de -5m contourlijn weer. De Noorderhaaks en NUN zijn groen ingekleurd.

Naast aanlanding van de noordelijke punt van de NUN treden er ook grote veranderingen op in het zuidelijke deel van de NUN. Hier vormt zich een ebschaar en bouwt een groot ebschild op. Dit ebschild zorgt ervoor dat het Molengat hier vernauwt (Figuur 2-7). Deze ontwikkelingen hebben grote gevolgen voor de aanliggende kustlijn (zie het volgende Hoofdstuk).

Een vergelijking van de 2021 en 2001 bodems (Figuur 2-7 versus Figuur 2-4) laat duidelijk zien dat de grootste veranderingen zijn opgetreden in het westelijke en noordelijke deel van de buitendelta. In het zuidelijke deel zijn de veranderingen beperkt. Hier blijven de hoofdgeulen op de buitendelta: Schulpengat en Nieuwe Schulpengat vrij stabiel liggen en ook op de Zuiderhaaks zijn de veranderingen beperkt. Aan de westzijde van de Noorderhaaks gaat de erosie onverminderd door.

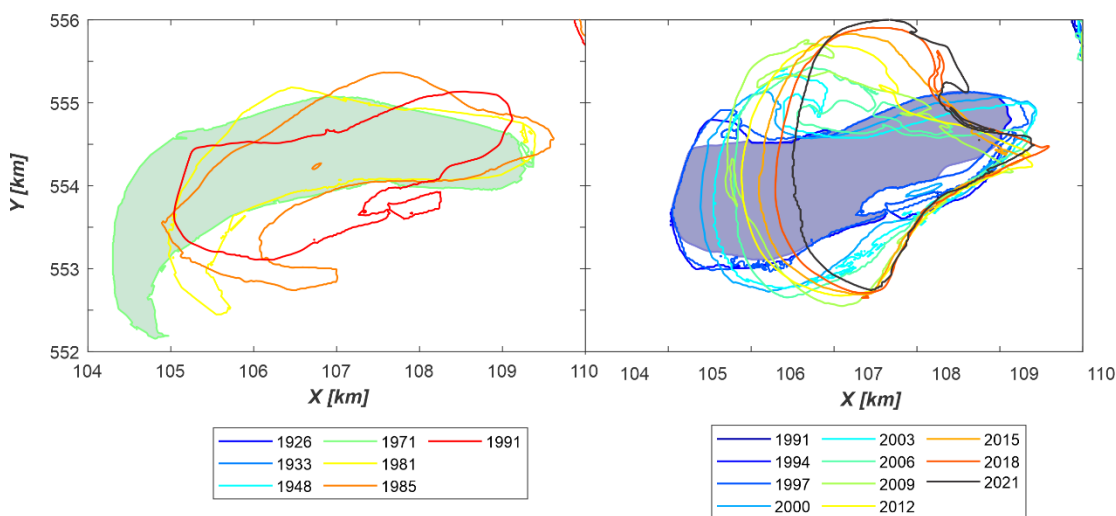
Het volumeverlies ligt hier op ongeveer 3 miljoen m³/jaar (Elias en van der Spek, 2017). Het geërodeerde zand draagt bij aan de vervorming van de Noorderhaaks; de westzijde verplaatst landwaarts. Aan de zuidzijde wordt de voormalige geul Westgat volledig opgevuld en aan de noordzijde bouwt de Noorderhaaks uit.



Figuur 2-7: Overzicht van de belangrijkste platen en geulen in het Zeegat van Texel (bodem gebaseerd op de 2021 Vaklodingen).

2.5 Samenvatting ontwikkeling van de noorderhaaks

De 1971 bodemopname is de eerste bodem waarin de Noorderhaaks zich boven gemiddeld laagwater heeft ontwikkeld. In 1971 is een langgerekte, maanvormige bodem zichtbaar met een zuidelijk gerichte oriëntatie. Er ontstaat een spit aan de zuidzijde van de bank die zich landwaarts kromt. Tussen 1985 en 1991 landt deze spit aan en er ontstaat een meer ovaalvormige bank. De westzijde van de Noorderhaaks heeft zich dan al 700 m oostelijk (landwaarts) verplaatst. Het merendeel van deze verplaatsing trad tussen 1971 en 1981 op. Tussen 1981 en 1997 blijft de westzijde van de Noorderhaaks vrijwel stabiel in positie, maar vanaf 1997 trekt de westzijde zich weer sterk terug. In totaal 1,5 km tussen 1997 en 2021. Er ontstaat dan ook een spit aan de noordzijde van de bank. Deze spit maakt rond 2006 verbinding met het landwaarts gelegen deel van de Noorderhaaks, waardoor een wigvormige bank met een brede voorkant ontstaat. Ten opzichte van de 1971 opname ligt de westzijde van de bank meer dan 2 km verder oostelijk. De vormverandering en de sterke terugtrekking moet ook de zandtoevoer richting de NUN hebben beïnvloed.



Figuur 2-8: Vormverandering van de Noorderhaaks aan de hand van de 0 m-contour lijn. NB: de initiële bodem is ingekleurd. In de figuur links is dit de 1926-bodem en in de figuur rechts de 1991-bodem.

3 Uitwisseling van NUN, Molengat en Texel

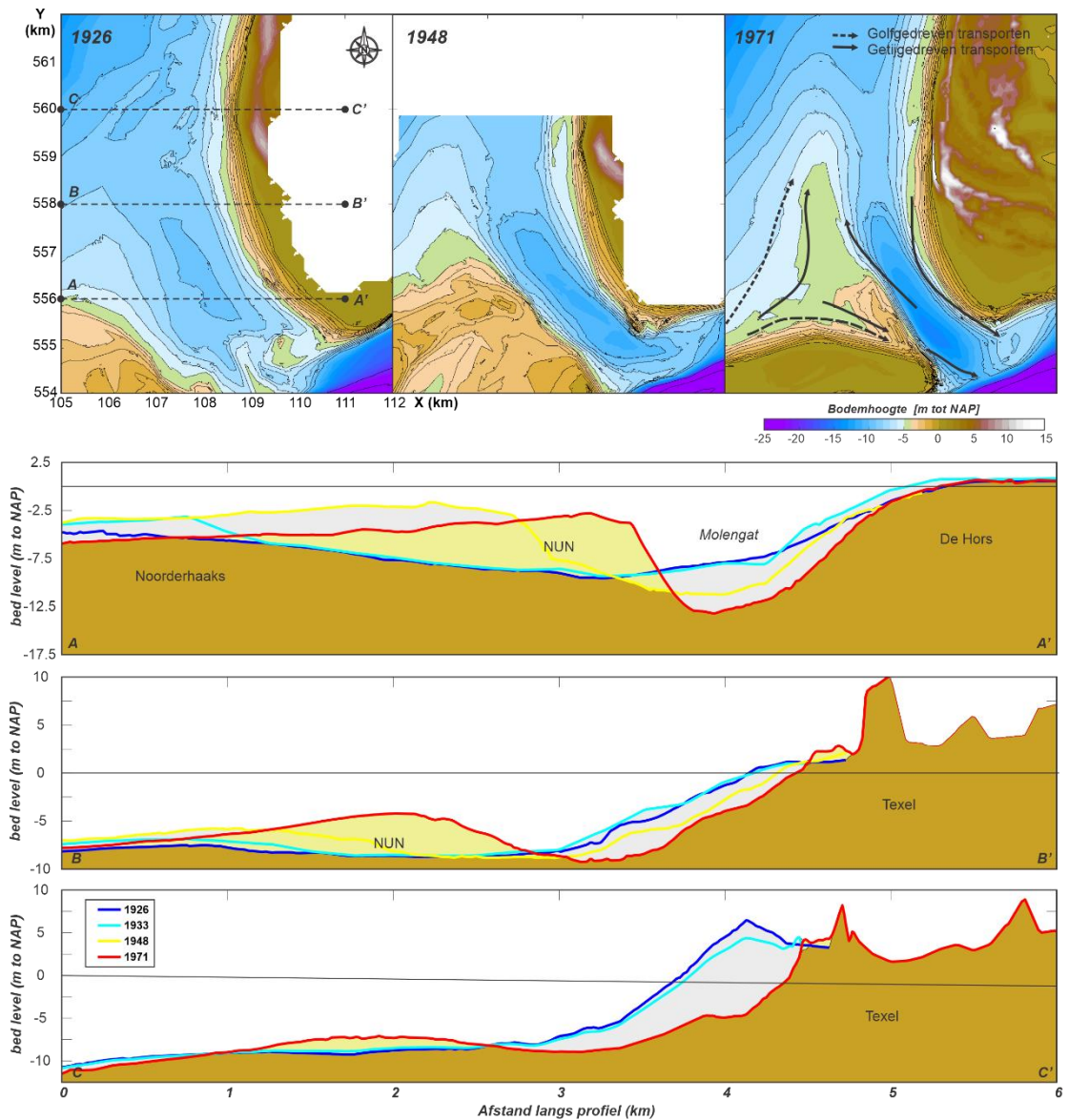
3.1 Het ontstaan van de NUN (1926-1971)

De initiële vorming van de NUN is een vrij lineair proces, dat in gang gezet wordt door afsluiting van de Zuiderzee (zie vorige hoofdstuk). De westzijde van de Noorderhaaks erodeert, migreert landwaarts en neemt in hoogte toe door golfwerking. De kustlangse getijstroming van het Noordzeegetij zorgt dat dit sediment zowel zuidelijk als noordelijk van de Noorderhaaks neerslaat. Een deel van het sediment wordt langs de randen van de Noorderhaaks landwaarts verplaatst en beland zo in de geulen. Aan de noordzijde belandt dit sediment in het Molengat. Tijdens vloed wordt dit materiaal terug het zeegat in getransporteerd, maar tijdens eb wordt het weer noordelijk afgezet. Zowel het kustlangs Noordzeegetij als het getij door het Molengat voeden de noordzijde van de Noorderhaaks, waardoor hier een langgerekte spit vormt (de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks). Golfbreking op deze spit zorgt ervoor dat er aan de zeezijde nog een extra landwaarts transport optreedt. De getijgedreven stromingen in het Molengat zijn sterk in het zuidelijke deel, maar nemen af met toenemende afstand tot het zeegat en zijn dan ook niet in staat het noordelijke deel van de NUN zeewaarts te houden. Dit deel verplaatst dan ook landwaarts. De NUN ontwikkelt in deze periode als een klassieke spit en tussen deze spit en de kust van Texel ontwikkelt het Molengat zich als een langgerekte geul (Figuur 3-1).

De groei van de NUN en verdieping van het Molengat worden in detail geïllustreerd aan de hand van 3 representatieve dwarsprofielen in (Figuur 3-1, onder). *Dwarsprofiel A-A'* doorsnijdt het zuidelijke deel van de NUN en het Molengat. Het Molengat is in 1926 nog zo'n 4,5 km breed met een maximale diepte van 9,5 m. De breedte neemt snel af naar 2,0 km in 1948 en 1,4 km in 1971. De diepte is daarbij toegenomen tot meer dan 13 m. De sterke toename van de diepte laat zien dat het getij een grote rol speelt. Het doorstroomoppervlakte en het getijprisma door de geul zijn aan elkaar gekoppeld. Met verkleining van de breedte moet de geul wel dieper worden om voldoende doorstroomoppervlakte te behouden. Het zeewaartse deel van de Noorderhaaks erodeert, wat een zandaanbod geeft voor de landwaarts gelegen NUN die hier kan opbouwen. De NUN bereikt hier een hoogte van NAP-2,8 m in 1971.

Twee kilometer noordelijk, *raai B-B'*, begint de NUN zich ook al te vormen. De hoogte neemt hier met meer dan 6 m toe, van NAP-8,6 m tot NAP-2,5 m. Opbouw van de NUN zorgt er ook voor dat er een geul zichtbaar wordt tussen de NUN en de kust. De geuldiepte blijft hier echter wel gelijk aan de diepte die oorspronkelijk aanwezig was. Er treedt hier geen grote verdieping op. Wel is zichtbaar dat geulvorming gepaard gaat met grote erosie van de kustlijn. Op een diepte van -5 m verplaatst de kustlijn 410 m landwaarts.

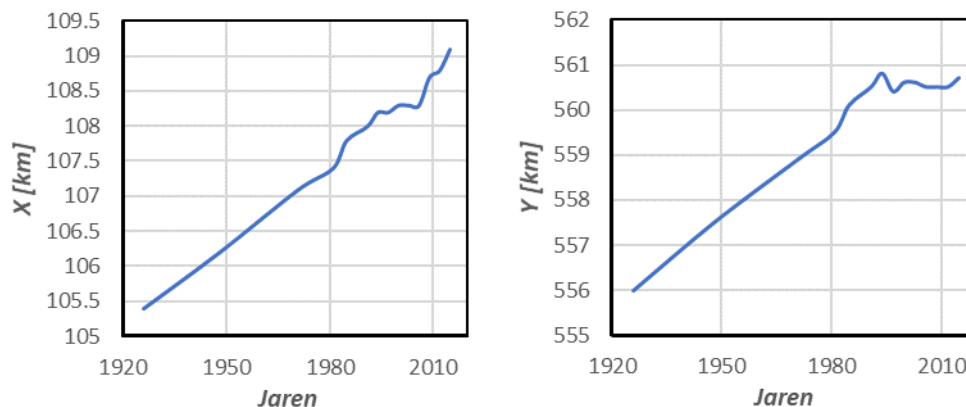
Ook in *raai C-C'* begint de vorming van de NUN zichtbaar te worden. Hier neemt de hoogte met 1,5 m toe. In deze raai is ook de grote erosie van de kustlijn zichtbaar. De kust verplaatst 640 m landwaarts.



Figuur 3-1: Het ontstaan van de NUN. Bodemveranderingen over de periode 1926-1971 op basis van de vaklodingen. In de vakloding van 1971 zijn conceptueel de sediment transport patronen ingetekend.

3.2 Groei van de NUN en verdieping Molegengat (1971-2000)

Na vorming van de NUN worden de morfologische processen een stuk complexer. Niet alleen de voeding van sediment vanaf de Noorderhaaks naar de NUN is dan belangrijk, maar ook de morfologische processen op de NUN zelf gaan een rol spelen in de ontwikkelingen. De NUN bouwt zich steeds verder noordelijk uit en neemt in hoogte toe. Deze opbouw zorgt ervoor dat de landwaarts gerichte, golf-gedreven transporten toenemen. Een maximale lengte van de NUN wordt bereikt rond 1995, daarna overheerst landwaartse verplaatsing (Figuur 3-2). Deze landwaartse verplaatsing versneld rond 2006 en stopt na verhelving van de NUN met de kust van Texel in 2015.



Figuur 3-2: Verplaatsing van de kop van de NUN aan de hand van de -5 m contour in (links) x-richting (west-oost) en (rechts) y-richting (zuid-noord).

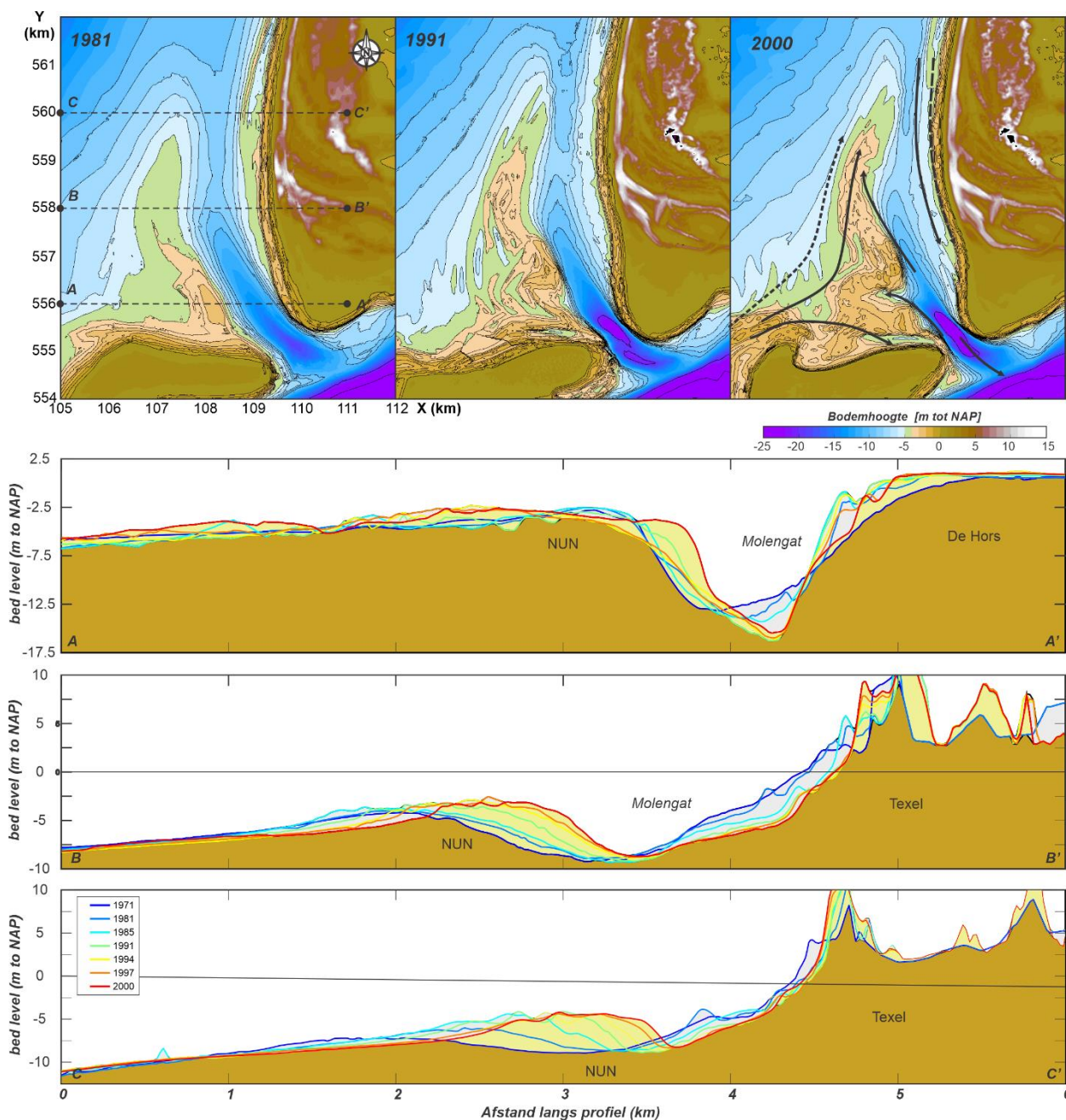
Vanaf de Noorderhaaks, aan de landwaartse zijde van de NUN, vormt een hoge langgerekte bank die zich als een drempel noordelijk uitstrekt (Figuur 3-3). Deze langgerekte banken vormen vaak langs de hoofdgeulen. Een goed voorbeeld hiervan is het Zeegat van Ameland (Elias et al. 2019), maar ook langs de Zoutkamperlaag is dit proces zichtbaar (Elias en Oost, 2019). Net als bij de andere zeegatsystemen is deze bank niet stabiel. Er vormen zich kleine geultjes, schaaftjes, die de bank gaan doorsnijden. De vorming van zo'n ebschaar is al zichtbaar in 1985. De ebschaar groeit vervolgens uit tot een volledig ebschaar en ebschild systeem en bereikt een maximale omvang rond 1997. Na 1997 neemt de ebschaar weer in omvang af en is in 2003 dan vrijwel verdwenen (Appendix A, Figuur A-5).

De ontwikkeling van de representatieve raaien verschaft meer inzicht in de groei en verplaatsing van de NUN en het Molengat (Figuur 3-3, onderste 3 deelfiguren). In *raai A-A'* neemt de diepte toe van 13 m in 1971 naar een maximale diepte van meer dan -16 m in 1991, waarbij het diepste deel van de geul 330 m landwaarts verplaatst. Sinds 1991 blijft de geul in positie liggen en neemt de diepte af tot -15,4 m in 2000. De geulbreedte neemt ook af van 1,4 km in 1971 tot 1,0 km in 2000. Het diepste deel van de geul is daarbij 330 m landwaarts verplaatst. Het geulprofiel vertoont hierbij een opmerkelijk verloop. Tot 1991 verplaatst het diepe deel van de geul wel landwaarts maar blijft de zeewaartse geulwand vrijwel stabiel in positie. De landwaartse geulwand verplaatst zelfs zeewaarts (270 m), waardoor de geulwand steiler wordt. Na 1991 verplaatst het bovenste deel van de geulwand terug landwaarts. Ook de NUN verplaatst dan sterk landwaarts. Tussen 1991 en 2000 ligt deze verplaatsing op een kleine 400 m. De hoogte van de NUN neemt over de gehele periode met 1,5 m toe. Sinds 1994 blijft deze hoogte dan ongeveer gelijk op -2,70 m.

Raai B-B' toont een continue landwaartse verplaatsing van de NUN. In totaal is dit ongeveer 500 m in de periode 1971-2000. De hoogte neemt toe tot een evenwichtshoogte die fluctueert tussen de -2,6 en -3,0 m. Het Molengat neemt hier iets in diepte af, van -9,3 naar -8,7 m, maar verplaatst landwaarts. Hierdoor is er een grote erosie van de kust te zien. Het diepere deel van de landwaartse geulwand verplaatst 510 m (op basis van de -5 m contour). De gemiddelde waterlijn vertoont een

landwaartse verplaatsing van 240 m. De afname van de kust gaat gepaard met een sterke opbouw van de duinen.

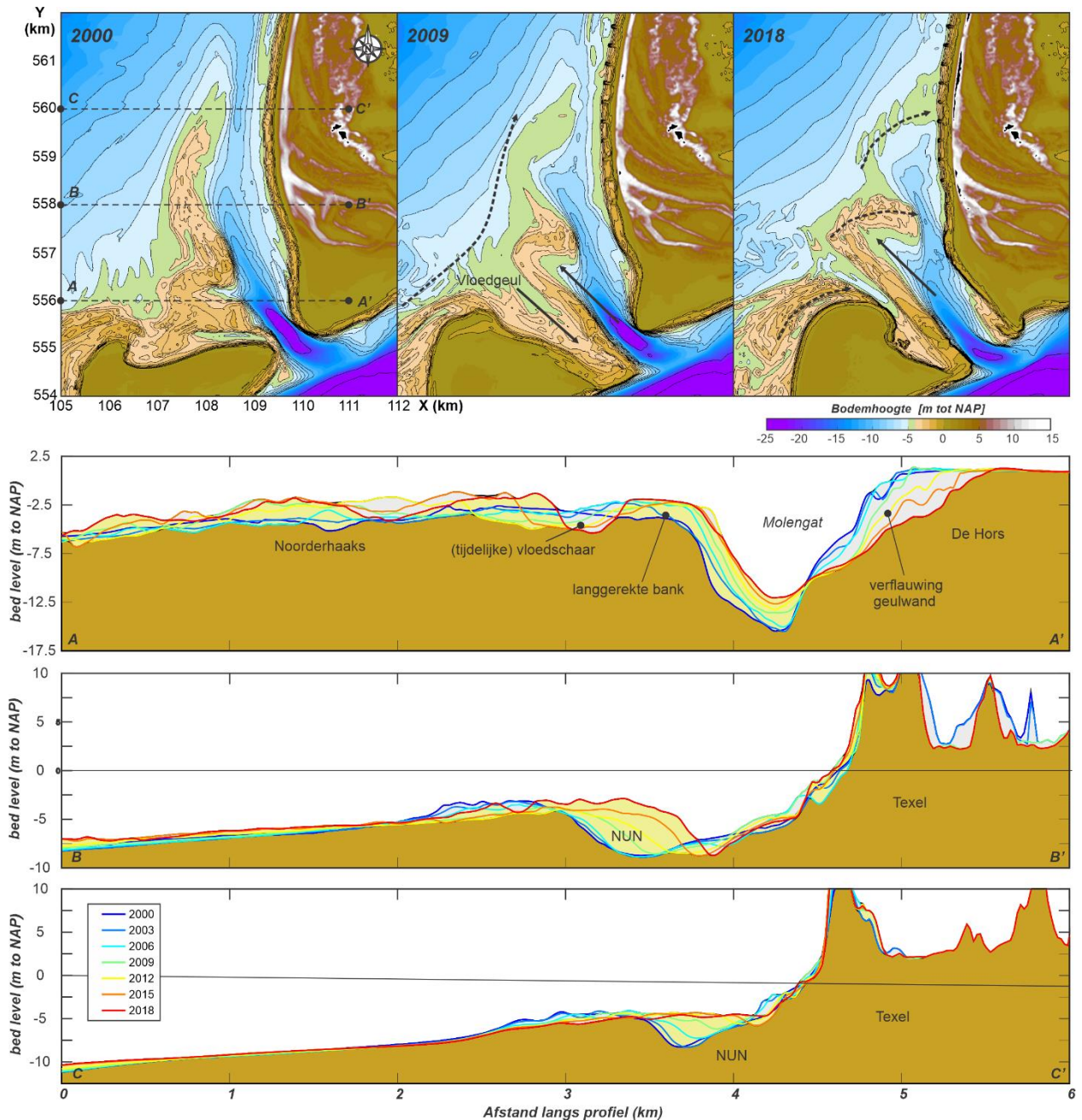
Raai C-C' geeft een beeld van de landwaartse verplaatsing van de kop van de NUN. Hier ligt de evenwichtshoogte op NAP-4,5 m. De NUN was in 1971 nog maar beperkt zichtbaar maar is sterk gegroeid. Een maximale hoogte wordt bereikt in 1985 van NAP-4,5m. De NUN is dan 870 m landwaarts verplaatst. Na 1985 blijft de hoogte van de NUN ongeveer gelijk, waarbij NAP-4,5 m voor deze locatie een natuurlijke evenwichtshoogte lijkt te zijn. In de periode 1985-2000 blijft de NUN blijft wel 560 m landwaarts verplaatsen. Ook hier treedt sterke erosie van de kust op. Het diepere deel van de kust (-5m contour) verplaatst 330m landwaarts. De verplaatsing van de 0 m contour bedraagt een kleine 90 m. Hierbij moet opgemerkt worden dat er bijna 130 m verplaatsing was in 1994, maar sindsdien verplaatst de kust weer zeewaarts.



Figuur 3-3: Groei, verlenging en landwaartse verplaatsing van de NUN en het Molengat. Bodemveranderingen over de periode 1971-2000.

3.3 Aanlanding van de NUN en vorming van een ebschild (2000-2018)

In de periode 2000-2021 treedt een duidelijke verandering in het gedrag van de NUN op. Er ontstaat nu een tweedeling in de morfologische ontwikkeling. Ten noorden van het ebschild (raai B-B') vindt een doorgaande verlanding van de NUN plaats. Ten zuiden hiervan vormt een nieuw, groot ebschaar en ebschild systeem in navolging van het eb-schaar en -schildstelsel dat vormde in de periode 1991-1997 (zie H3.2). Het gedrag van dit ebschaar en -schildstelsel is anders dan de ontwikkeling in de voorgaande periode. Waarschijnlijk speelt de vormverandering van de Noorderhaaks en daarmee de veranderingen in zandtoevoer, een belangrijke rol in verandering in morfologisch gedrag van de NUN en daarmee de vorming van dit eb-schaar en -schildstelsel (Figuur 2-8).



Figuur 3-4: Aanlanding van de NUN. Bodemveranderingen over de periode 2000-2021.

De noordzijde van de NUN wordt direct beïnvloed door de vormverandering van de Noorderhaaks. De aan de noordzijde van de Noorderhaaks ontwikkelende spit (1997-2006) zorgt ervoor dat de bovenzijde van de Noorderhaaks een noordwest-zuidoost oriëntatie krijgt en er ontstaat hier een vloedgeul. Tussen de vloedgeul en het Molengat vormt een langgerekte, hoge bank. Deze bank maakt verbinding met het al uitdempende ebschaar en -schildstelsel. Sedimenttransporten over deze bank zorgen ervoor dat het ebschild weer sterk groeit en zich uitbouwt in oostelijke richting (het Molengat in). Het is mogelijk dat de vloedgeul een deel van de stroming door het Molengat overneemt, omdat in deze periode het Molengat ook sterk in omvang en diepte afneemt.

De groei van het ebschild is waarschijnlijk een belangrijke reden waarom de lengte van de NUN in de periode 2000-2021 niet meer toeneemt. Het zand slaat in het ebschild neer en bereikt daardoor het noordelijke deel van de NUN (ten noorden van raai 558) niet meer. Dit deel van de NUN verplaatst dan landwaarts en verheelt in 2015 met de kust van Texel. De hoogte en het volume van de NUN nemen hier dan af. Dit proces zet zich ook in 2021 nog steeds door.

In *raai A-A'* verplaatst de NUN nog 170 m landwaarts tussen 2000 en 2012. Sindsdien blijft NUN vrijwel stabiel liggen. Wel blijft het Molengat in diepte afnemen van -15,4 m in 2003 naar -12,0 m in 2018. De landwaartse geulwand vertoont tussen 2006 en 2021 een sterke verflauwing. Hierdoor treedt er grote erosie van de kustlijn op. De 0 m contour verplaatst 510 m landwaarts. Het dwarsprofiel toont ook de noordelijke verplaatsing van de Noorderhaaks.

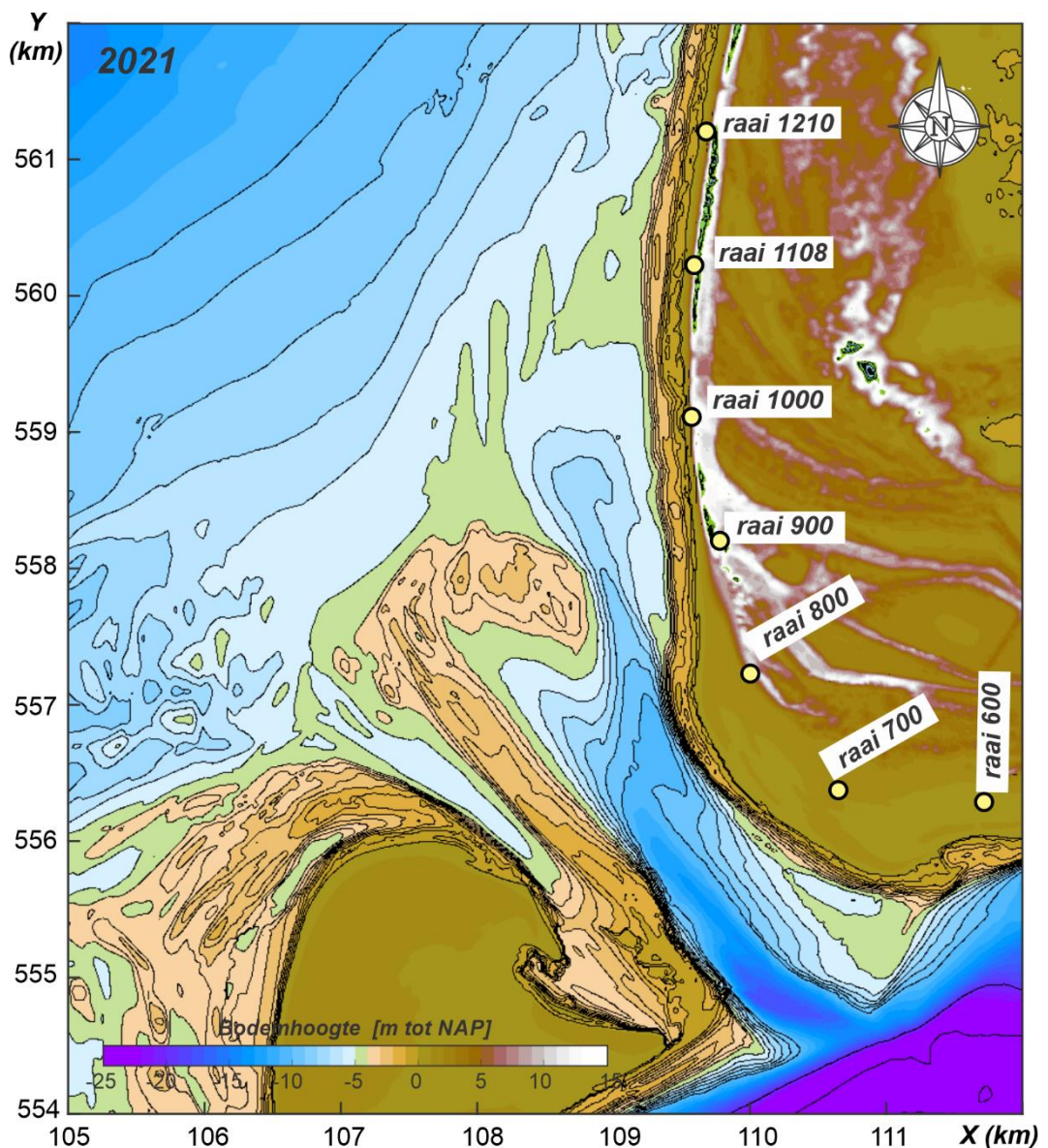
In *raai B-B'* is de groei van de NUN, door opbouw van een ebschild, duidelijk zichtbaar. Het ebschild drukt het Molengat voor een groot deel dicht. De breedte neemt af van 1,4 km in 2003 naar 730 m in 2018. Het merendeel van deze verplaatsing treedt op tussen 2006 en 2018. Gemiddeld geeft dit een afname van de geulbreedte met ruim 50 m/jaar. Bij voortzetting van het huidige gedrag duurt het nog meer dan 10 jaar voor de geul volledig dichtgezet is.

Raai C-C' illustreert de aanlanding van de NUN met de kust. Tot 2006 blijft er nog een geultje zichtbaar. Dit vult vervolgens snel op. In 2018 is er dan al geen geultje meer te onderscheiden. De hoogte van het diepere deel van de NUN neemt hierbij 1,5 m in hoogte af.

4 Samenhang kustlijn en NUN.

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de samenhang tussen de ontwikkeling van de kustlijn en de ontwikkeling van de NUN en het Molengat in meer detail beschouwd. Hiervoor worden de JARKUS data geanalyseerd. Het voordeel van de JARKUS metingen is dat deze jaarlijks beschikbaar zijn. Hierdoor kan de kustlijnontwikkeling in veel meer detail gevolgd worden. Het grootschalige kustgedrag in de JARKUS is uiteraard gelijk aan dat van de Vaklodingen. Enige overlap in deze analyses is dus aanwezig. De JARKUS metingen zijn ongeveer elke 250 m beschikbaar. In dit hoofdstuk zijn representatieve raaien met ongeveer 1-km tussenafstand geselecteerd (Figuur 4-1). Een BKL- en MKL-ligging is alleen beschikbaar noordelijk van raai 900.

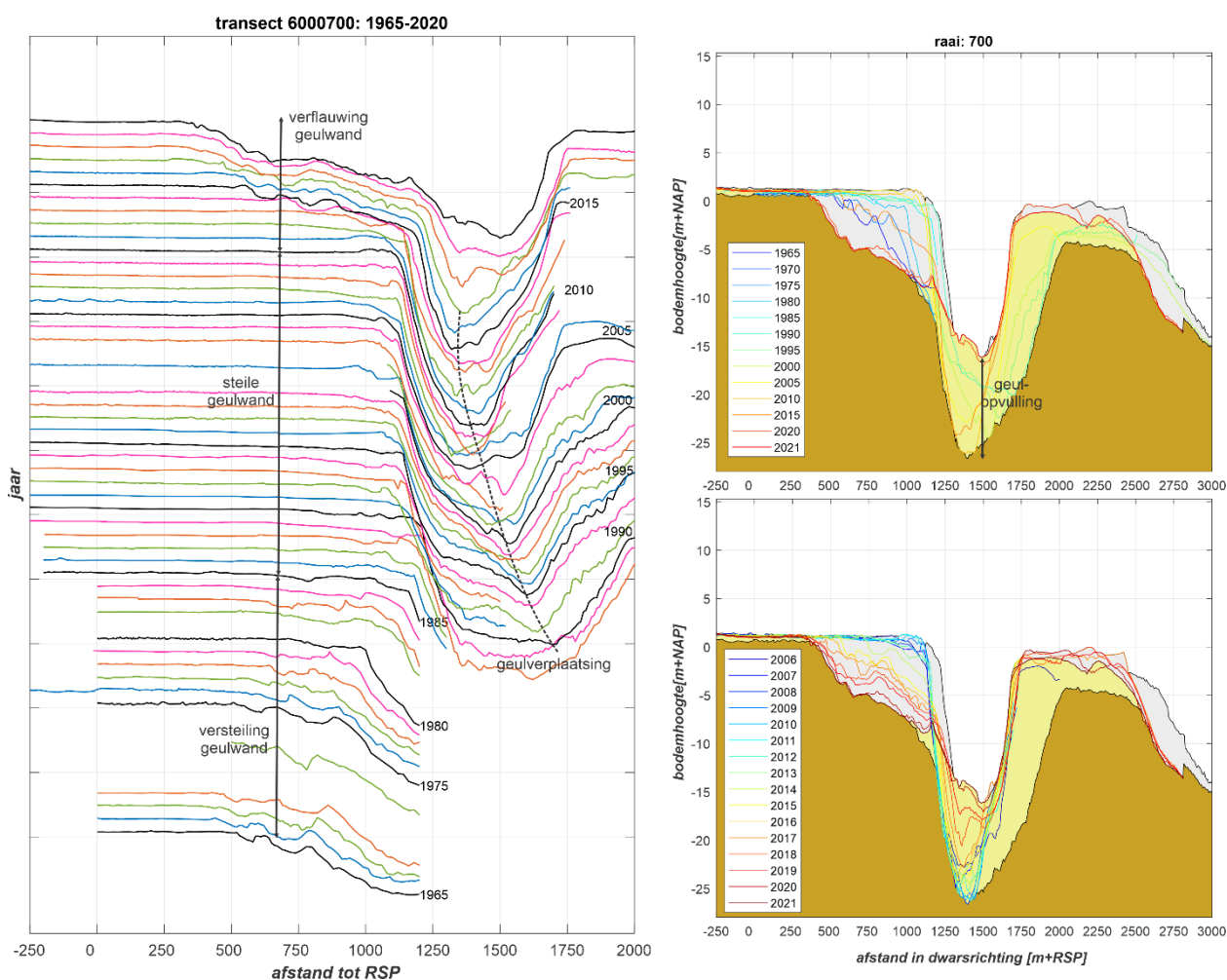


Figuur 4-1: Overzicht van de 2021 bodemligging en de KM-raaien.

4.2 Raai 700

Raai 700 geeft een goed beeld van de ontwikkeling van het diepe deel van het Molengat gelegen tussen de oostelijke punt van de Noorderhaaks en De Hors. In de periode 1965-1988 is alleen de oostelijke geulwand (De Hors) ingemeten. Deze geulwand verandert van een flauw profiel naar een steile geulwand. Deze versteilling gaat gepaard met een uitbouw van De Hors. De gemiddeld laagwaterlijn verplaatst bijna 600 m zeewaarts tussen 1965 en 1990. De steile geulwand blijft dan langere tijd behouden. Wel verplaatst de gehele geulwand landwaarts. Tussen 1990 en 2013 verplaatst de geulwand 100 m tegelijkertijd verplaatst de westzijde van de geul meer dan 300 m. Het afnemen van de geulbreedte resulteert in een sterke verdieping. De geuldiepte neemt toe van -20 m (1985) tot -26,5 m in 2006.

De geuldiepte vertoont een korte periode met een diepte rond de -26 m (2006 - 2010), maar neemt sindsdien sterk af. In 2021 is de diepte met meer dan 10 m afgenomen tot -16 m. Het diep deel van de geul vult op, maar de oostelijke geulwand vertoont een grote erosie. Ten opzichte van de maximale westelijke uitbouw ligt de 2021 gemiddeld laagwaterlijn bijna 800 m verder landwaarts. De geulopvulling en terugtrekking van de kustlijn lijken zich top op heden onverminderd door te zetten. In de timestack van Figuur 4-2 zijn deze ontwikkelingen aangegeven.



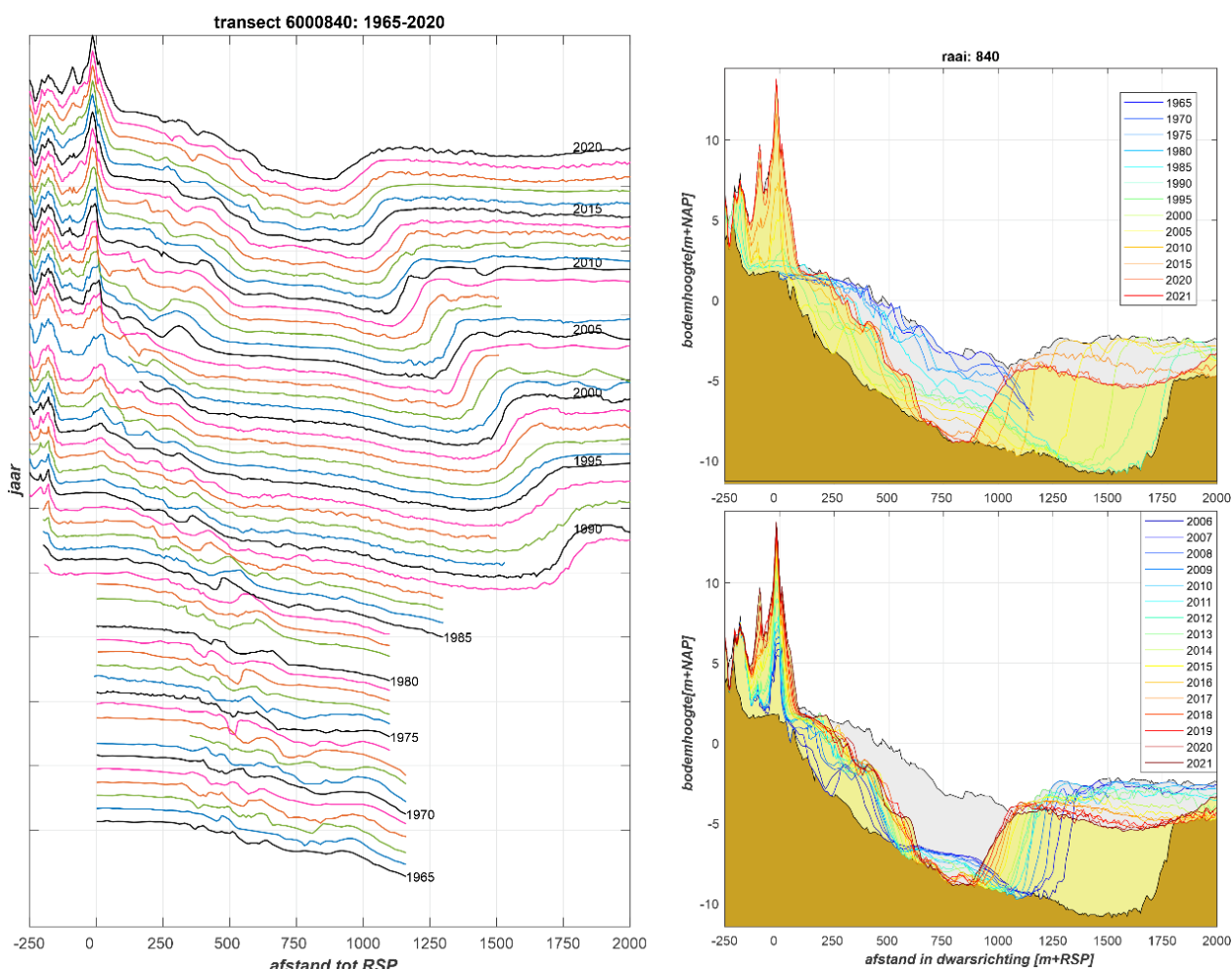
Figuur 4-2: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 700 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder). In deze figuren ligt de kust aan de linkerkant van de figuur.

4.3 Raai 840

Raai 840 is direct gelegen achter het ebschild. De NUN verplaatst tussen 1989 en 2021 landwaarts. Wel is er in deze ontwikkeling een verschil in gedrag te onderscheiden. Tot 2000 heeft de NUN een hoogte tot -2,2 m en verplaatst de gehele NUN landwaarts. Na 2000 blijft de NUN wel landwaarts verplaatsen, maar neemt de hoogte af tot -4 tot -5,5 m.

De kustlijn van Texel vertoont hier twee duidelijke ontwikkelingen. Tussen 1965 en 1995 is de kustlijn meer dan 400 m teruggetrokken. Vanaf 1995 is dan een tegenovergestelde trend te zien en bouwt de kust met bijna 200 m terug uit. Het Molengat is daarbij sterk in omvang (breedte) afgenomen van 1,5 km in 1965 naar 400 m in 2021 (op basis van de -5 m contourlijn). Ook de diepte van het Molengat neemt daarbij af. In 1990 lag de diepte nog op -11 m. Dit is afgenomen tot -8,5 m in 2021. De afname van zowel geulbreedte als diepte laat zien dat de getijstromingen hier een kleiner effect op de ontwikkelingen krijgen.

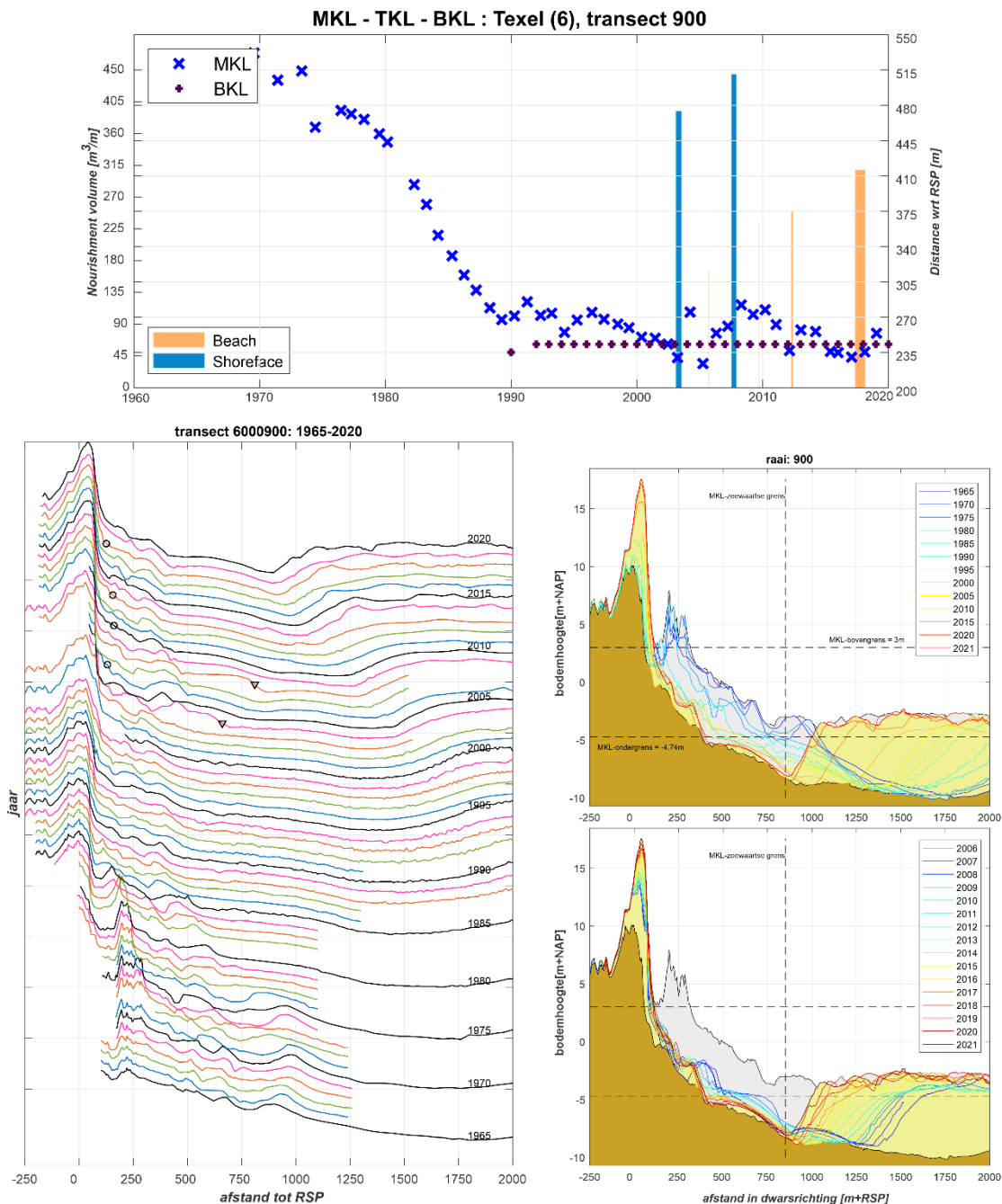
Wat ook opvalt is de duinvorming die is opgetreden. De vorming van een nieuwe duinenrij begint tussen 1990 en 1995 zichtbaar te worden. In 2021 zijn de duinen dan bijna 15 m hoog.



Figuur 4-3: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 840 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

4.4 Raai 900

Raai 900 ligt net ten noorden van het ebschild. Dit is ook de eerste raai waarin een BKL bepaald is en waarvoor de MKL berekend wordt (Figuur 4-4, boven). Het MKL-verloop vertoont een sterke, vrijwel lineaire afname van het volume in de periode 1970-1990. Na 1990 nemen de volumes wel af, maar met kleinere snelheid. Rond 2000 treedt dan voor het eerst een BKL-overschrijding op. Sindsdien wordt de MKL rond de BKL gehandhaafd, maar hiervoor zijn wel frequent (om de 3-5 jaar) terugkerende suppleties nodig. Ook in dit profiel is de landwaarts migrerende NUN zichtbaar en ook hier neemt het Molengat in omvang en diepte af.

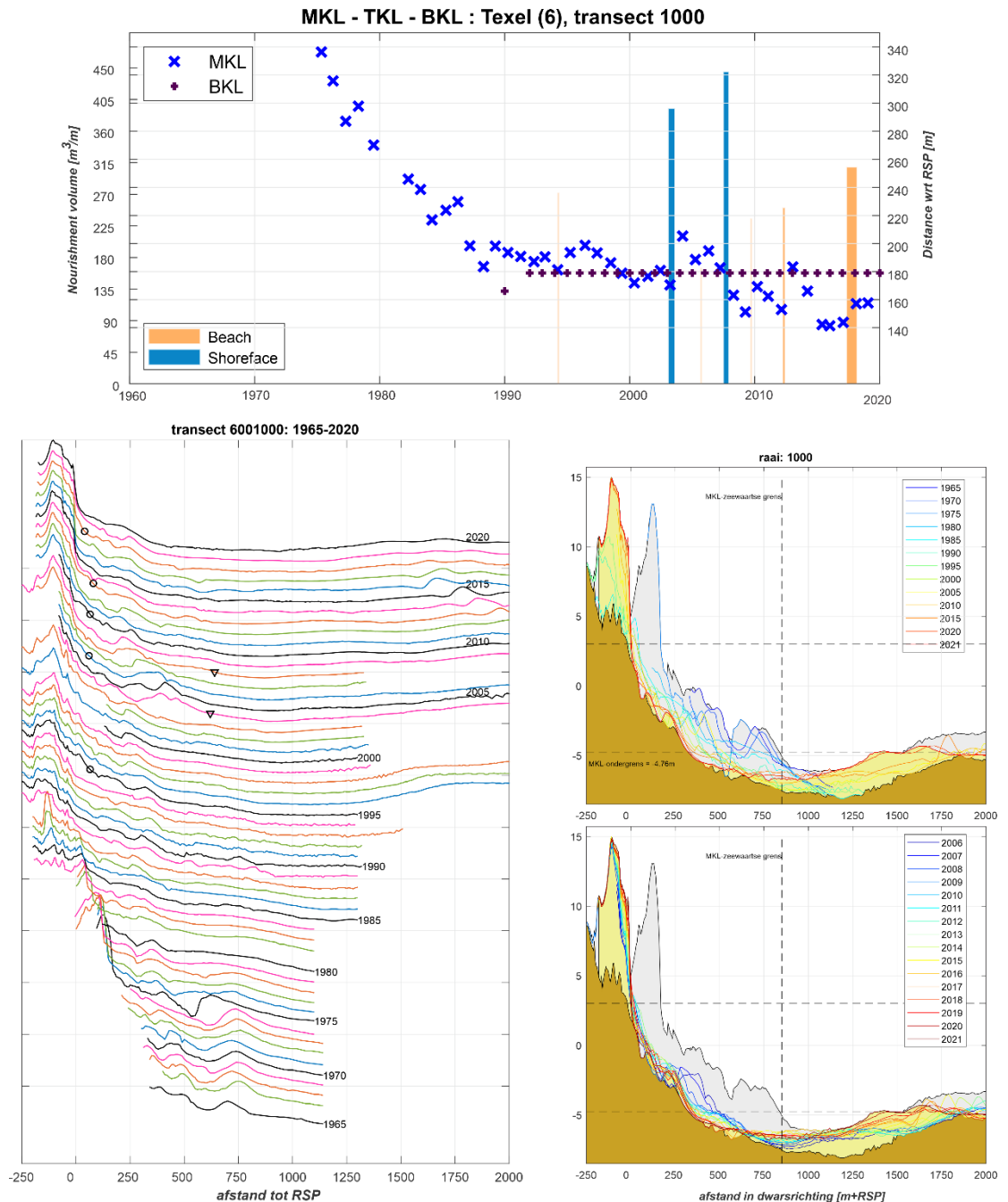


Figuur 4-4: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 900 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

4.5 Raai 1000

Raai 1000 ligt net ten zuiden van het aanlandingspunt van de NUN. In deze raai vertoont de MKL een sterke neerwaartse trend tot 1990 en een kleinere trend van terugtrekking sindsdien (Figuur 4-5). Tot 2007 blijft de MKL nog slingeren rond de BKL, maar in de periode 2007-2020 bevindt de MKL zich ondanks herhaald suppleren structureel landwaarts van de BKL.

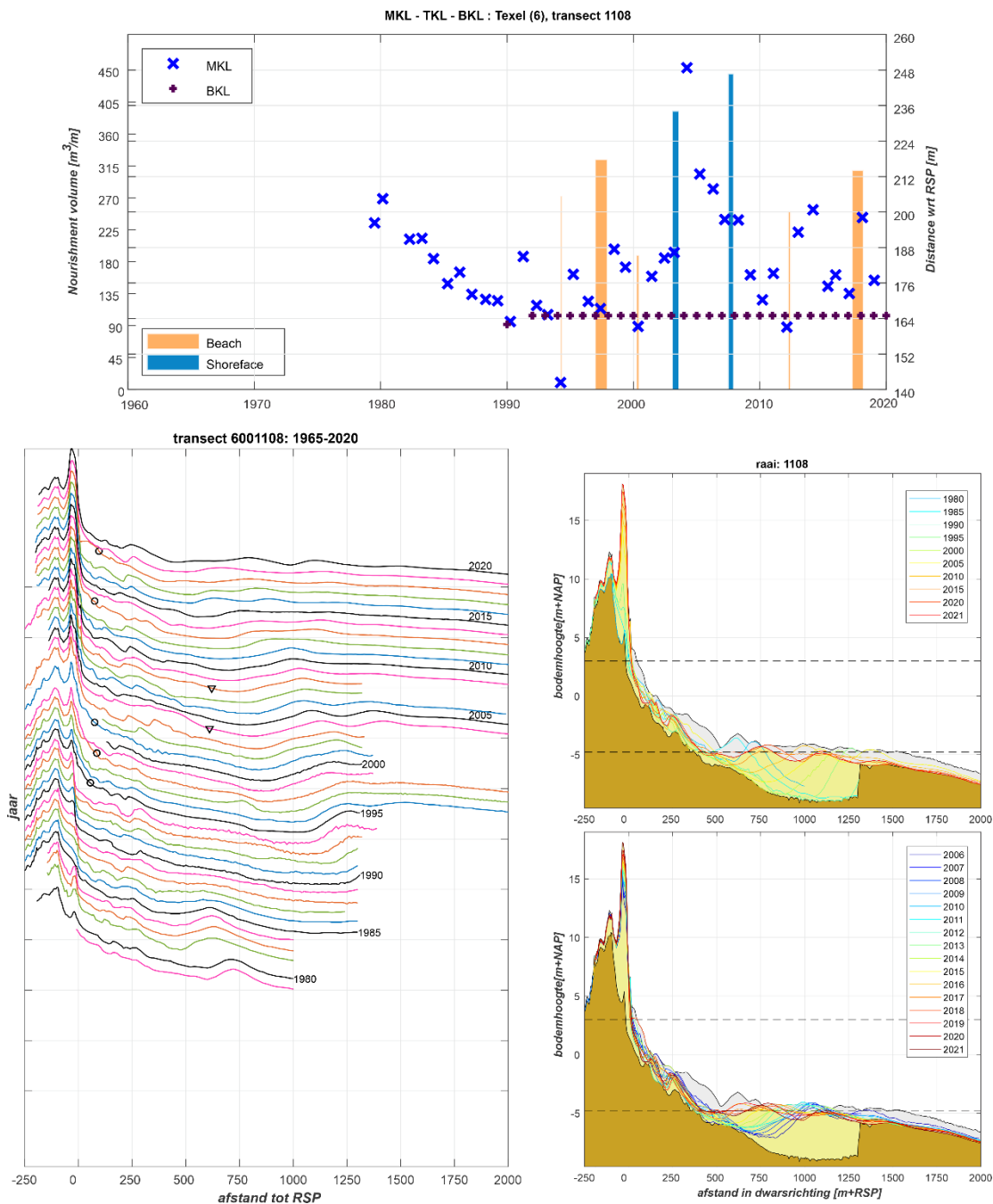
De profiel ontwikkeling (Figuur 4-5) laat zien dat er structurele erosie van de vooroever optreedt. Wel ontwikkelt ook hier een groot duin landwaarts van de RSP-lijn. In de vooroever is de NUN als kleine verhoging zichtbaar. De NUN verplaatst zich landwaarts en neemt daarbij in hoogte af.



Figuur 4-5: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 1000 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

4.6 Raai 1108

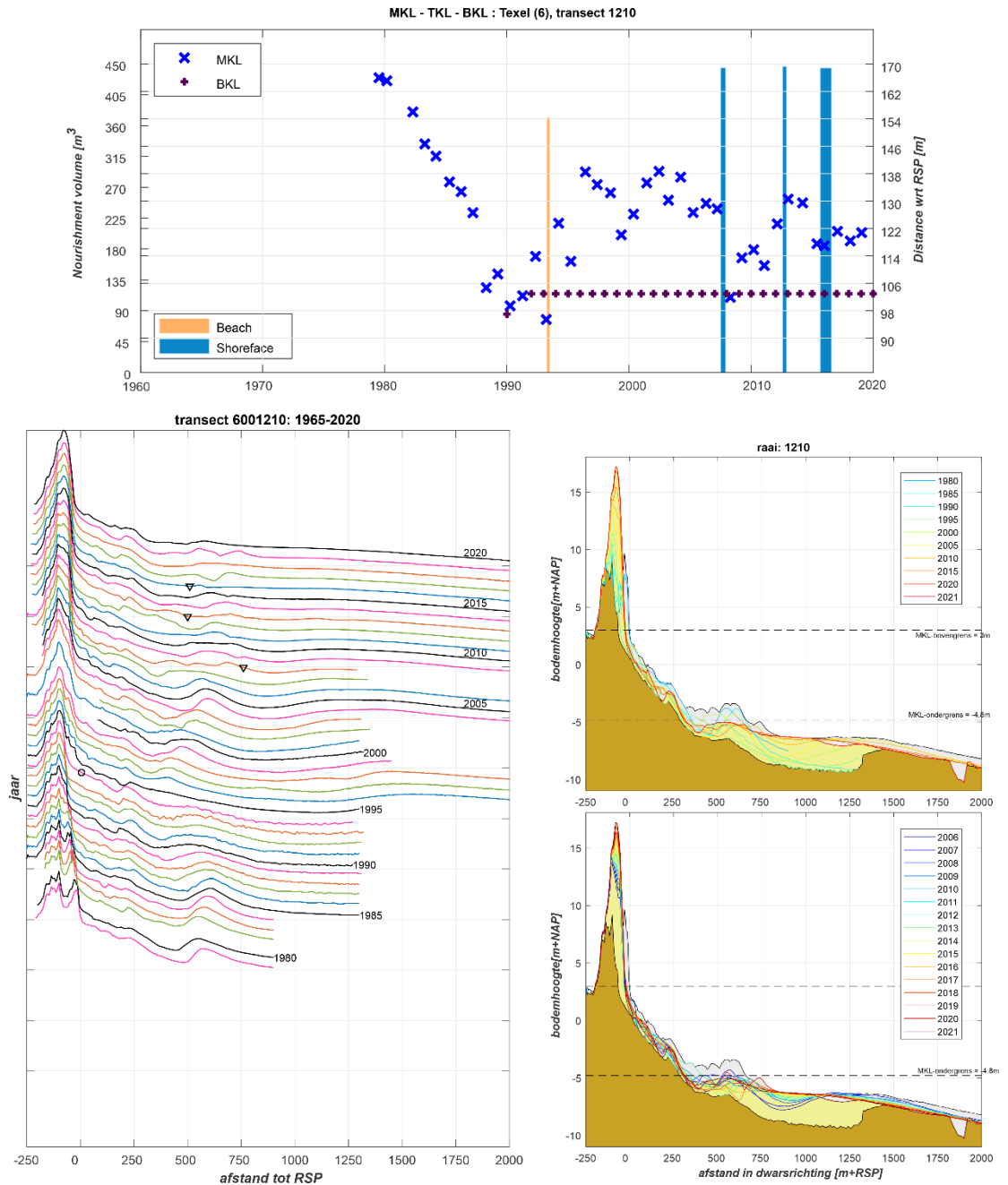
Raai 1108 doorsnijdt het aanlandingsgebied van de NUN (Figuur 4-6). In dit profiel is de NUN tot 2004 niet geheel gemeten. Dit geeft een enigszins vertekend beeld van de dwarsdoorsnede. De NUN is zichtbaar als bank met een hoogte rond de -5 m. In 1990 ligt de voorzijde van de NUN op ongeveer 1250 m tot de RSP. De NUN migreert landwaarts en in 2006 is er slechts een klein ondiep geultje wat de NUN en de kust van Texel scheidt. Vanaf 2016 is de NUN volledig verheeld en er ontstaat een ondiep platform met een hoogte van -5 m. Rond de 1500 m tot de RSP gaat dit platform over in het ongestoorde kustprofiel. Op het platform hebben zich enkele grote banken ontwikkeld.



Figuur 4-6: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 1108 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

4.7 Raai 1210

Ook in raai 1210 is de invloed van de aanlanding van de NUN nog zichtbaar. Het diepere deel van het kustprofiel, onder de NAP-5 m, neemt in hoogte toe. Ten opzichte van de 1980 bodem ligt de vooroever zo'n 2,5 m hoger. Dit deel van het profiel ligt buiten de MKL rekenschild en is dus in de MKL volumes niet direct zichtbaar. Met het opvullen van de diepere vooroever verandert ook het morfologische gedrag. Tot 2007 was er in de vooroever nog een brekerbank zichtbaar (zo tussen de 500 m – 750 m tot de RSP). Deze brekerbank is na 2007 vrijwel niet meer zichtbaar. Ook in dit profiel worden de duinen flink hoger.



Figuur 4-7: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 1210 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

4.8 Invloed van suppleties op de MKL

Vanaf raai 900 richting het noorden zijn veelvuldig suppleties ingezet voor handhaving van de MKL (Tabel 4-1). Het merendeel van deze suppleties zijn strandsuppleties. Ook zijn er ten zuiden van raai 1200 twee vooroeversuppleties uitgevoerd. Deze vooroeversuppleties zijn op de geulwand van het Molengat aangebracht en zouden dan ook als geulwandsuppletie kunnen worden geclassificeerd. Wat opvalt is het verschil in MKL-ontwikkeling in respons op deze suppleties, zowel per suppletie als per raai.

In raai 1000 zorgt de in 2003 uitgevoerde vooroeversuppletie wel voor een tijdelijke zeewaartse verplaatsing van de MKL, maar de 2007-vooroeversuppletie lijkt hier vrijwel geen effect te hebben, aangezien de MKL hier bijna onverminderd landwaarts verplaatst tot 2009 (Figuur 4-5). Strandsuppleties zijn hier nodig om de kustlijn (MKL) dynamisch te handhaven. Deze ligt dan nog vrijwel continue landwaarts van de BKL. De kleinere strandsuppleties uitgevoerd in 2005, 2009 en 2012 lijken allen tijdelijk de MKL zeewaarts te verplaatsen. Na 2 tot 3 jaar ligt de MKL dan weer terug op de oorspronkelijke positie.

In raai 1108 is een soortgelijke respons op de vooroeversuppleties te zien. Na de 2003 vooroeversuppletie verplaatst de MKL tijdelijk ver zeewaarts en neemt daarna continue af tot uitvoering van de strandsuppletie in 2012. De vooroeversuppletie van 2009 heeft hier vrijwel geen effect op. In deze raai blijft de MKL over het algemeen zeewaarts van de BKL liggen.

In raai 1210 lijken de vooroeversuppleties een groter effect te hebben. Hier blijft de MKL een jaar of 6 toenemen na de vooroeversuppletie van 2007. Waarschijnlijk is dit gerelateerd aan de brekerbank die hier dan nog van nature aanwezig is. De suppleties van 2012 en 2017 lijken slechts een beperkt effect te hebben. Deze respons is waarschijnlijk enigszins vertekend omdat deze raai vrijwel de kop de suppletie doorsnijdt. De grote vooroeversuppletie van (4 miljoen m³) die in 2015 is aangelegd is hier niet echt zichtbaar omdat raai 12100 het begin van de suppletie weergeeft. Het merendeel van de suppletie ligt noordelijk (tussen raai 12100 en 21110).

Een belangrijke conclusie uit de geobserveerde responses is dat vooroeversuppleties zich hier niet ontwikkelen in banken die dan langere tijd zichtbaar zijn in het profiel. Een reden hiervoor kan zijn dat voorafgaand aan de suppleties brekerbanken ook van nature niet aanwezig waren ten zuiden van raai 1210. Onder invloed van de aanlanding van de NUN vormt het natuurlijke systeem hier een uniform platform met een hoogte net onder de -5 m en geen brekerbanken. De suppleties worden hierin opgenomen.

Tabel 4-1: Overzicht zandsuppleties Zuidwest Texel ten zuiden van raai 1200.

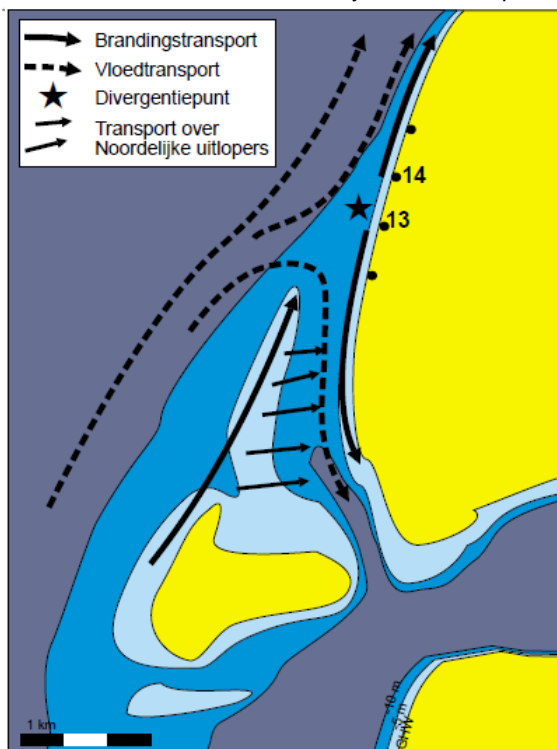
Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ) [miljoen m ³]
Texel-Zuidwest	1993	12.10	18.13	strandsuppletie	2,245
Texel-Zuidwest	1994	9.30	12.10	strandsuppletie	0,761
Zuidwest	1997	10.38	11.43	strandsuppletie	0,340
Zuid	2000	10.01	11.90	strandsuppletie	0,357
Zuidwest / Den Hoorn	2003	9.00	11.48	Vooroeversuppletie/geulwandsuppletie	0,972
Zuidwest	2005	8.80	10.63	Strandsuppletie	0,301
Zuidwest	2007	9.00	13.92	Vooroeversuppletie/geulwandsuppletie	2,000
Zuidwest	2009	9.00	10.70	Strandsuppletie	0,400
Zuidwest	2012	9.00	12.10	strandsuppletie	0,751
Zuidwest	2012	12.00	13.12	vooroeversuppletie	0,500
Zuidwest	2015	12.10	21.11	vooroeversuppletie	4,004
Zuidwest	2017	9.00	11.90	strandsuppletie	0,895
Zuidwest	2021	9.00	12.98	strandsuppletie	1,000

5 Synthese

Dit hoofdstuk vat de inzichten opgedaan in deze studie in de vorm van een synthese samen. Paragraaf 5.1 geeft een beknopt overzicht van de ontwikkelingen van De Hors en presenteert een conceptueel model dat de onderliggende processen beschrijft die de ontwikkelingen aandrijven. In paragraaf 5.2 wordt een beknopte toekomstverwachting gepresenteerd. Deze twee paragrafen vormen de basis van de aanbevelingen van suppleties die mogelijk ingezet kunnen worden om de erosie van zuidwest Texel te mitigeren.

5.1 De NUN in relatie tot erosie van zuidwest Texel

Na afsluiting van de Zuiderzee ontwikkelt de NUN zich lange tijd als een klassieke spit. De grote zandtoevoer van de eroderende Noorderhaaks zorgt ervoor dat de NUN zich noordelijk kan ontwikkelen. Deze groei zet zich tot ongeveer 1995 onverminderd door, waarna een maximale uitgroei wordt bereikt. Een conceptuele beschrijving van de werking van de NUN en de invloed ervan op de kustlijn representatief voor deze maximaal ontwikkelde NUN wordt gegeven in Cleveringa (2001) en samengevat in Figuur 5-1. Onderzoek door Elias (2006) laat zien dat ook het Molengat een rol speelt in de ontwikkeling. Het Molengat zorgt ervoor dat er een ebdominant transport langs de binnenzijde van de NUN optreedt. Deze ebstromingen verklaren ook de vorming van een ebschaar en ebschildstelsel in de periode (1985-1997).



Figuur 5-1: Conceptueel sedimenttransport model van de kust van zuidwest Texel, het Molengat en de Noorderhaaks. Onder invloed van het gemiddelde jaarlijkse golfklimaat vindt langs de kust ten noorden van strandpaal 14 brandingstransport naar het noorden plaats en ten zuiden van strandpaal 13 brandings-transport naar het zuiden. Langs de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks vindt brandingstransport naar het noorden plaats en er vindt ook golfgedreven transport over de Noordelijke uitlopers naar de kust plaats. De vloedstroom divergeert voor de kust van zuidwest Texel, een deel gaat verder noordelijk langs de kust en een deel gaat door het Molengat). Uit: Cleveringa (2001)

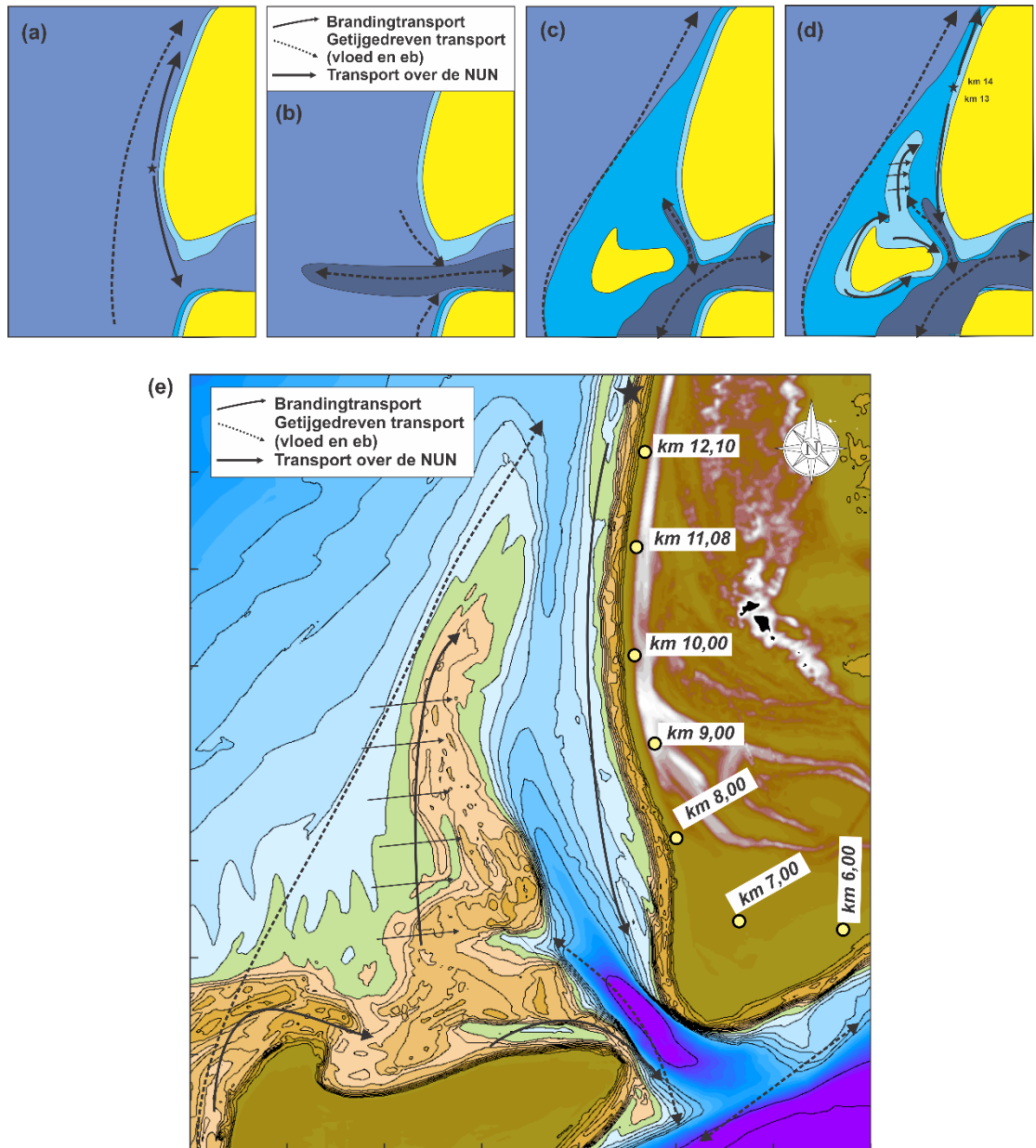
De processen binnen het bovenstaande conceptuele model worden verder uitgewerkt in Figuur 5-2. In principe worden de sedimenttransporten langs de kust van zuidwest Texel bepaald door het getij en de golven. De interactie met de bodemconfiguratie maakt de sedimenttransportpatronen complex. Zonder zeegat zou het transportpatroon betrekkelijk eenvoudig zijn. Het Noordzee getij veroorzaakt een klein netto noordwaarts transport (Figuur 5-2a). Het getij-gedreven transport is groter op diep water dan op ondiep water omdat de bodemwrijving met afnemende diepte een groter invloed uitoefent. Door golven ontstaat op de ondiepe vooroever een brandingstransport. Dit transport wordt hoofdzakelijk gegenereerd door golfbreking. Golfbreking woelt sediment op dat

verplaatst kan worden door de getijstroming. Ook worden golf-gedreven stromingen gegenereerd, wat de sedimenttransporten vergroot. Door de bolle vorm van de kust van Texel ontstaan gradiënten in het brandingstransport. Ter plaatse van de maximale kromming van de kustlijn ontstaat hier een divergentiepunt, waar een maximale erosie optreedt. Dit proces speelt al lange tijd en om deze erosie tegen te gaan zijn er tussen 1959 en 1987, 24 strandhoofden aangelegd tussen raai 900 en raai 1800 (Rakhorst, 1984; Verhagen en Van Rossum, 1990). Deze strandhoofden hebben ervoor gezorgd dat de achteruitgang van de kustlijn ongeveer gehalveerd is (Rakhorst, 1983).

Naast het Noordzee-getij is ook het getij door het zeegat van Texel van belang (Figuur 5-2b). Ieder getij vult en ledigt het achterliggende bekken door het Marsdiep heen. Het gehele getijvolume wordt door de nauwe opening van het zeegat geperst waardoor grote stroomsnelheden ontstaan. Deze stromingen schuren de geulen diep uit. In theorie ontstaat nu een zeegat met een diep centrale (eb) geul en secundaire (vloed) geulen aan weerszijden van het zeegat. Deze vloedgeulen zorgen vaak voor erosie van de aanliggende kustlijnen. Bij zuidwest Texel is dit de geul Molengat die grote stromingen langs de westzijde van De Hors genereert.

Het vullen en ledigen van het bekken creëert niet alleen geulen maar een buitendelta aan de zeezijde van het zeegat (Figuur 5-2c). De patronen van zandplaten en geulen op de buitendelta beïnvloeden de hierboven beschreven processen. Door onder andere de aanwezigheid van de Noorderhaaks en de vorm van het bekken zijn de hoofdgeulen van het zeegat van Texel zuidwaarts gericht en van minder belang voor de kustlijn van Texel. De smalle opening tussen de Noorderhaaks en De Hors heeft er wel voor gezorgd dat hier lokaal grote stroomsnelheden optreden en het Molengat is hier dan ook diep uitgeschuurd. De Noorderhaaks beïnvloedt ook het Noordzee getij. Contractie om de buitendelta heen zorgt ervoor dat de stroomsnelheden hier lokaal toenemen en er een extra noordwaarts transport vanaf de buitendelta richting de (diepere) vooroever van Texel optreedt.

Refractie van de golven op de buitendelta en golfbreking op de ondiepe delen zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kust (Figuur 5-2d). De zuidelijke golven kunnen niet doordringen tot zuidwest Texel en noordelijke golven kunnen de kop van Noord-Holland niet bereiken. Deze golfafscherming zorgt er ook voor dat het convergentie punt in brandingstransport verschuift. Golfbreking op de westzijde van de Noorderhaaks zorgt voor een landwaarts transport van sediment. Enerzijds zorgt dit voor een vervorming en verhoging van de Noorderhaaks, maar dit voedt ook de getijstroming door opwoeling van zand. Het resultaat is dat er een spitvormige uitbouw van de Noorderhaaks ontstaat. (de NUN). Deze spit wordt gevoed vanaf de zeezijde door het Noordzee-getij, vanaf de landzijde door de zeegat gedreven stroming in het Molengat en door golfgedreven transporten op de spit zelf (Figuur 5-2d). Naast lokale beïnvloeding van het getij en de golven zorgt de NUN er ook voor dat sediment de kust niet bereikt. Het sediment accumuleert immers in de NUN. Ook het Molengat speelt een belangrijke rol in sedimentafvoer van de kust. De erosie van het ondiepe deel van het kustprofiel is waarschijnlijk golfgedreven, maar door de ligging van het Molengat ontstaat een efficiënte kustlangse afvoer van het sediment. Zodra dit sediment het Marsdiep bereikt wordt het tijdens vloed het bekken in getransporteerd en tijdens eb het zuidelijke deel van de buitendelta op. Sedimenttransport vanuit het Marsdiep terug het Molengat in is waarschijnlijk beperkt. Het Molengat voert niet alleen de kustlangse sedimenttransporten efficiënt af, maar ook het transport vanaf de Noorderhaaks. Dit transport verplaatst zich richting de NUN of het Marsdiep, maar niet richting de kust.



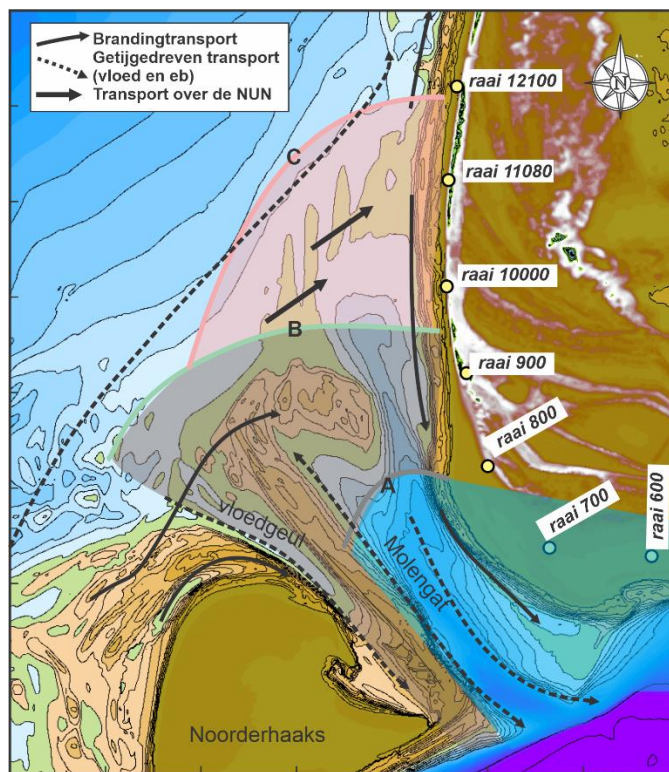
Figuur 5-2: Conceptuele weergave van de onderliggende processen bij zuidwest Texel. (a) uniforme kustprocessen, (b) de bijdrage van getijstromingen door het zeegat, (c) vorming van de buitendelta en (d) lokale beïnvloeding van de processen door de buitendelta. (e) Processen ingetekend op de 2000 bodem.

Het conceptueel model van Cleveringa (2001) is representatief voor de situatie rond 2000 (Figuur 5-2e), maar met doorgaande vervorming van de buitendelta wijzigen ook de sedimenttransportpatronen. De processen zoals weergegeven in Figuur 5-2a,b,c wijzigen hier in principe niet. Wel verandert de interactie van de bodem met deze processen (Figuur 5-2d). De Noorderhaaks speelt waarschijnlijk een belangrijke rol in de opgetreden veranderingen.

Voor de huidige situatie wordt een conceptueel model gepresenteerd in Figuur 5-3. Als onderbouwing van dit conceptuele model worden zijn de geobserveerde morfologische veranderingen en de resultaten van Delft3D modellering gebruikt (Appendix C, Figuur C-2 en C-3). Erosie van de zeezijde van de Noorderhaaks wordt door golven landwaarts getransporteerd. Een deel van dit sediment voedt de NUN rechtstreeks. Een deel van dit sediment wordt via de Noorderhaaks richting het Molengat gevoerd. Tijdens eb wordt dit dan langs de landwaartse zijde

van de NUN in noordelijke richting getransporteerd. Tot ongeveer 2000 was dit mechanisme zeer efficiënt in het voeden van de NUN. De NUN bereikt in de periode 1995 - 2000 zijn meest noordelijke ligging.

De Noorderhaaks heeft zich sindsdien sterk landwaarts verplaatst en de bank heeft een wigvorm gekregen met een brede voorzijde en een smalle punt richting het Marsdiep. Tussen de Noorderhaaks en het Molengat is een vloedgeul ontstaan. Deze vloedgeul draagt bij aan de zandtransporten richting het Molengat. Tijdens vloed verdwijnt dit materiaal in het zeegat en wordt richting het bekken getransporteerd (gebied A in Figuur 5-3). Tijdens eb accumuleert het zand in een langgerekte bank en het ebschild via de ebstroming door het eb-schild. Het is waarschijnlijk dat deze bank en ebschild het merendeel van het noordwaarts gerichte zand invangt waardoor er minder voeding richting het noordelijke deel van de NUN plaatsvindt. Het noordelijke deel van de NUN (gebied C) wordt onder invloed van golven en de getijstrooming langzaam opgeruimd. Dit is zichtbaar middels twee ontwikkelingen vanaf 2000: 1) de NUN bouwt niet verder noordwaarts en migreert – onder invloed van golven – landwaarts; 2) het eb-schaar- en -schild-systeem bouwt uit vanaf deze periode (gebied B).



Figuur 5-3: Conceptueel sedimenttransport model van de huidige (2021) kust van zuidwest Texel, het Molengat en de Noorderhaaks. In gebied A neemt het Molengat sterk af in omvang en domineert kustlijn erosie door verondieping van het Molengat. Gebied B beschrijft het groeiende, zuidelijke deel van de NUN. Hier accumuleert sediment in een groot ebschild. Lokaal zorgt dit voor gradiënten in de brandingstransporten, waardoor gebieden van kustlijnerosie en sedimentatie elkaar afwisselen. Gebied C beschrijft het uitdempende, noordelijke deel van de NUN. De aanvoer van sediment vanaf de NUN zorgt voor verondieping van de diepere vooroever (beneden de -5 m contour), maar is niet toereikend om de erosie van het ondiepe kustprofiel (boven de -5m) te compenseren.

De vorming van de vloedgeul langs de Noorderhaaks heeft mogelijk ook een rol gespeeld in de recente afname van de grootte van het Molengat. Ten zuiden van raai 800 was een diep Molengat gevormd met steile geulwanden (Gebied A). Deze steile geulwanden bleven lange tijd stabiel, maar rond 2010 treedt hier een verandering op (Figuur 4-2). De geuldiepte begint sterk af te nemen en verplaatst zeewaarts. De oostelijke, landwaartse geulwand vertoont dan een grote verflauwing, waardoor de gemiddeld laagwaterlijn van de westelijke zijde van de Hors bijna 800 m landwaarts is verplaatst. De verflauwing van de geulwand illustreert de afname van de getijstrooming door het Molengat in de afgelopen jaren.

Ten noorden van raai 800 (gebieden B en C) overheersen de golf-gedreven transporten. In de vooroever is wel de geul Molengat te zien, maar deze geul veroorzaakt niet direct de erosie van de kustlijn. De geul ontstaat doordat de NUN opbouwt en landwaarts migreert. De migratie van de NUN verkleint het doorstroom oppervlakte van de geul, maar de diepte neemt hier niet toe (zie bijv.

ontwikkeling raai 900, Figuur 4-4). De geul wordt hier niet zoals in raai 840 (Figuur 4-3) de kust ingedrukt. De kustlijnerosie concentreert zich in het ondiepe deel van het profiel en is waarschijnlijk golf gedreven. De voorliggende geul en NUN vormen wel een belangrijk onderdeel van het erosieproces. De getijstrooming door de geul is in staat het sedimenttransport kustlangs te verspreiden. Sediment dat vanaf de diepe vooroever aangevoerd wordt accumuleert in de NUN, waardoor er een sedimenttekort in de kustzone ontstaat.

Lokaal kan het kustgedrag wel afwijken. Zo vindt er recentelijk rond raai 800 een aanzanding van de kust plaats. Deze aanzanding komt waarschijnlijk door de lokale golfafscherming door het groeiende, voorliggende ebschild, waardoor gradiënten in de golfenergie ontstaan.

Tussen raai 1000 en 12100 vindt aanlanding van de NUN plaats. Deze aanlanding vindt plaats in het diepere deel van het profiel, onder de -5 m. Hier neemt de hoogte van de bodem toe. De aanlanding van de NUN heeft echter geen invloed op de golf-gedreven erosie van het ondiepe kustprofiel. Deze erosie vindt nog steeds onverminderd plaats. Er ontstaat hier een ondiep platform met een bodemhoogte rond de -5 m.

5.2 Toekomstige ontwikkeling van de NUN

De complexe morfologische veranderingen van de buitendelta maken het lastig een betrouwbare vooruitblik voor de toekomst te geven. Bij voortzetting van de huidige trend is het waarschijnlijk dat in *gebied C* de NUN verder dissipeert en langzaam opgenomen wordt in het kuststelsel. De invloed van de buitendelta zal hier afnemen, waardoor dit gebied zich meer als de 'ongestoorde eilandkust van Texel' zal gedragen. De brekerbank die hier aanwezig is zal zich dan iets verder zuidelijk kunnen uitstrekken. Het is echter niet de verwachting dat dit een hele grote invloed heeft op de kusterosie. De bolle eilandkust zal ook hier blijven eroderen.

In *gebied B* lijkt het waarschijnlijk dat de groei van dit ebschild verder doorzet. Op basis van de huidige ontwikkeling is op een termijn van ongeveer 10 jaar verheveling van dit ebschild met de kust van Texel wel te verwachten. Aangezien het ebschild veel hoger is dan het noordelijke deel van de NUN (NAP 0 m versus NAP-5 m resp.) is het ook waarschijnlijk dat plaatverheveling van het ebschild ook de ondiepe vooroever zal beïnvloeden. Hierdoor zou lokaal, tussen raai 800 en 1000 de kusterosie voor langere tijd gecompenseerd kunnen worden. Waarschijnlijk heeft zo'n verheveling ten noorden van km 11 weinig effect. De gradiënten in langtransport door golven worden hier niet beïnvloed. Het lijkt niet waarschijnlijk dat de zandtoevoer van de aangelande bank de verliezen hier kunnen compenseren. In dit deel van de kust zullen suppleties noodzakelijk blijven.

Een grote onzekerheid in morfologische ontwikkeling overheerst ten zuiden van het ebschild. Het is a priori niet te voorspellen wat de ontwikkeling van het Molengat gaat worden. Het huidige Molengat zal zeker in omvang en volume blijven afnemen. Het Molengat zal zich ter hoogte van de Hors initieel ontwikkelen als een brede, maar ondiepe vloedgeul. Dit gaat gepaard met erosie van De Hors. De zeewaartse ontwikkeling van het nieuwe Molengat is onzeker. Het is mogelijk dat het Molengat een nieuwe geul vormt langs de noordrand van de Noorderhaaks, waar zich nu ook een vloedgeul bevindt. Dit zou de aanlanding van de banken – waaronder het ebschild - gelegen tussen de vloedgeul en de kust bevorderen. Vorming van een nieuwe vloedgeul wordt echter tegengewerkt door het landwaarts verplaatsen van de Noorderhaaks. Als dit sediment niet door de vloedgeul kan worden afgevoerd ontstaat verbinding tussen de Noorderhaaks en de langgerekte bank. Er ontstaat zo een aaneengesloten, relatief hoog bankenoppervlak. Het Molengat is dan de enige geul die nog aanwezig blijft en zal dan wel gehandhaafd blijven. Het is dan mogelijk dat een nieuwe verbinding met de Noordzee ontstaat waardoor het ebschild in tweeën slijt. Dit bevordert aanlanding van het afgestoten deel van het ebschild. In dit scenario ontstaat een buitendelta, waarbij periodiek aanlandingsbanken ontstaan die zo tussen km 9 en 11 zullen aanlanden.

5.3 Mogelijke suppletie strategieën

Grootschalige veranderingen in de vooroever bij zuidwest Texel zijn in de toekomst wel te verwachten (zie vorige hoofdstuk). In de directe invloedssfeer van het zeegat (ten zuiden van raai 1100) zullen deze de kustlijnontwikkeling zeker beïnvloeden. Het lijkt hier waarschijnlijk dat er hier bankaanlandingen zullen optreden die een positief effect op de kustlijnontwikkeling zullen hebben. Deze veranderingen zullen waarschijnlijk op middellange termijn (orde 10 jaar) optreden. In de tussenliggende periode zullen de huidige processen zich nog wel voortzetten.

Ter overbrugging van deze periode kan hier gedacht worden aan: *voortzetting van de huidige suppleties*. Dit betekent dat in het gebied tussen km 8 en 11 zo ongeveer om de 3-4 jaar een suppletie moet worden aangebracht. Een evaluatie van de werking van de al uitgevoerde suppleties laat zien dat vooroeversuppleties hier niet direct een bijdrage leveren in de MKL-volumes. Het lijkt waarschijnlijk dat de verliezen in kustlangse richting (transporten) hiervoor te groot zijn. De strandsuppleties lijken in dit opzicht een meer geschikte optie.

Naast voortzetting van de huidige strategie kan ook gedacht worden aan *systeemsuppleties*. Systeemsuppleties zijn zandsuppleties waarbij de natuurlijke hydraulische en morfologische processen worden benut om de kustlijnontwikkeling op een positieve manier te beïnvloeden (Elias, 2020). In deze eerdere studies zijn vier mogelijke systeemsuppletie-varianten voor zuidwest Texel geanalyseerd (Appendix D). Hieronder volgt een aanvullende analyse van deze 4 varianten met inachtneming van de inzichten uit deze studie

Brekerbank (BB) suppletie (Appendix C, Figuur C-1A)

Langs de centrale eilandkust van Texel ligt al een doorgaande brekerbank. In deze variant verlengt een grote vooroeversuppletie deze brekerbank zuidwaarts. De bank sluit dan aan op de kust van Texel ter hoogte van raai 800. De suppletie doorkruist hierbij het noordelijke deel van het Molengat, maar sluit de geul niet geheel af. De totale lengte van de suppletie is bijna 4,5 km en heeft een volume van 1,8 miljoen m³. De aanleghoogte (ongeveer NAP-4 m) sluit aan op de hoogte van de natuurlijke brekerbank.

De structurele erosie van de ondiepe kustzone ontstaat door de gradiënten in de langstransporten. De diepe ligging van deze suppletie zal de erosieve processen niet direct beïnvloeden. Deze conclusie verandert niet op basis van de huidige studie.

Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) suppletie (Appendix C, Figuur C-1B)

Deze variant is een onderwatersuppletie op het meest noordelijke deel van de NUN met een lengte van bijna 1,9 km en een volume van 2,8 miljoen m³. De aanleghoogte van NAP-2,5 m is een stuk hoger dan de BB-variant. Deze hoogte is ongeveer gelijk aan het zuidelijker gelegen deel van de NUN, waar deze aansluit op de Noorderhaaks.

Op basis van de uitgevoerde modelering kon worden geconcludeerd dat de NUN suppletie zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kustlijn (Elias et al, 2020). Op deze manier draagt deze rechtstreeks bij tot een reductie van de erosie aan de kustlijn. Naast golfafscherming is er een extra zandaanbod op de NUN waardoor er meer transport richting de kust kan optreden. Het is mogelijk dat de suppletie uiteindelijk resulteert in een bankaanlanding en zo voor langere tijd de kustlijn kan voeden.

De analyse uitgevoerd in deze rapportage laat zien dat het noordelijke deel van de NUN sterk in hoogte en omvang afneemt. De afname van de NUN geeft niet direct een verlichting van de kusterosie. Er is wel een opbouw in het diepere deel van het kustprofiel (onder de NAP-5 m), maar erosie van de ondiepe kustzone gaat onverminderd door. Het lijkt niet waarschijnlijk dat het extra suppletiezand aangebracht op het noordelijke deel van de NUN een ander gedrag zal vertonen. Het migreert wel richting de kust, maar wordt dan in de ondiepe kustzone, kustlangs afgevoerd. Het

draagt dan wel bij aan het totale sedimentvolume van het kustvak, maar niet direct bij tot vergroting van het lokale MKL volume doordat het niet accumuleert in de ondiepe kustzone. De golf afscherpende werking van deze suppletie is afhankelijk van de verwachte erosie. De huidige NUN neemt duidelijk in hoogte af. Het is dan ook twijfelachtig of een suppletie zich hier lang als ondiepe bank kan handhaven. De natuurlijke processen lijken dit niet te ondersteunen. Het is de verwachting dat de suppletie dan snel in hoogte af zal nemen, waardoor golfafscherming maar een beperkte tijd kan optreden.

Zandmotor I (ZM I) suppletie (Appendix C, Figuur C-1C)

Deze variant is een kustlangse zandmotor tussen raaien 840 en 1230. Het heeft veel kenmerken van een strandsuppletie, maar volume (3,8 miljoen m³) en lengte (bijna 4 km) zijn veel groter. De aanleghoogte bedraagt ongeveer NAP+3 m op het strand. Deze variant brengt zand direct op de kustlijn en heeft daarmee een groot effect op de MKL. Deze verplaatst over de lengte van de suppletie gemiddeld 150 m zeewaarts. Andere voordelen van deze variant zijn het uit de kust drukken van het Molengat en bevordering van duingroei. Een risico is dat de stroming in het Molengat negatief beïnvloed wordt.

Op basis van de in deze studie gepresenteerde inzichten lijkt deze variant een interessante optie. De kustlijnerosie lijkt vooral gedreven door een zandtekort in de ondiepe zone. In het diepere deel vindt er aanzanding plaats. Kleine suppleties zijn slechts beperkt in staat de verliezen in de ondiepe zone te compenseren. De suppletie wordt snel weggevoerd uit het kustvak. Door het aanbrengen van een grote suppletie wordt de voeding in de ondiepe kustzone substantieel vergroot. Erosie op de ene locatie geeft voeding van de omliggende gebieden. Dit is mogelijk efficiënter dan kleine strandsuppleties.

Zandmotor II (ZMII) suppletie (Appendix C, Figuur C-1D)

Deze variant ligt haaks op de kust ter hoogte van raai 800-900 en lijkt qua vorm op 'de Zandmotor' in Zuid-Holland. De suppletie is ontworpen als een zanddam die verbinding maakt met het voorliggende ebschild. Dit ontwerp is zowel gericht op langdurig voeden van de aanliggende kustvakken als afsluiting van het Molengat. Hiervoor is een groot volume nodig: 8,9 miljoen m³.

Toepassing van deze variant ter plaatse van raai 800-900 geeft risico's. De verwachting is dat het aangebrachte zand zowel naar het noorden als naar het zuiden verplaatst. Aan weerszijden van de zanddam ontstaan luwtegebieden waarin sediment wordt ingevangen. Dit draagt bij aan een langdurig behoud van zandvolumes in de kustzone. Het afsluiten van het Molengat verkleint de kustlangse stroming en neemt zo een bron van erosie weg. Na splitsing van het Molengat krijgt het zuidelijke deel een enkele uitstroom met de ebschaar zeewaarts van de zandmotor. Het initiële effect op de MKL is dat over een lengte van 500 m de MKL gemiddeld 325 m zeewaarts verplaatst. Op basis van de uitgevoerde modelering werd geconcludeerd dat de ZMII suppletie een ingrijpende verandering in de processen in het noordelijke deel van de buitendelta. Deze suppletievariant heeft in potentie grote voordelen, maar hoe de morfologische ontwikkeling zich na aanleg precies gaat uitwerken is op basis van deze studie nog niet te voorspellen.

De huidige studie laat zien dat het voorliggende ebschild zich nog steeds ontwikkelt als dominant bankengebied. Deze ontwikkeling hangt samen met de veranderingen in de Noorderhaaks en het Molengat. Zowel de Noorderhaaks en het Molengat vertonen daarbij grote veranderingen. Het direct beïnvloeden van de processen hier lijkt niet wenselijk.

Een geschikte locatie voor uitvoering van deze suppletievariant is het aanlandingsgebied van de NUN (rond km 11). In dit gebied is een ondiep platform aanwezig met een hoogte van ongeveer NAP-5 m. Dit vrij ondiepe platform kan efficiënt opgevuld worden. Een suppletie tussen raai 1050 en 1128 met een zeewaartse lengte van 1 km en een kruinhoogte van 2 m vergt ongeveer 3,5 miljoen m³. Het is de verwachting dat zo'n suppletie kustlangs verspreidt en daarmee de aanliggende kustlijnen ten zuiden en noorden voor langere tijd voedt. De zuidelijke gerichte

sedimenttransporten kunnen bijdragen aan de aanlanding van het eb-schild. Deze suppletie vormt een mogelijk alternatief voor de ZM I variant.

6 Conclusies

Een verdiepingsslag op de ontwikkelingen van de NUN heeft veel aanvullend inzicht opgeleverd in de samenhang tussen het zeegat (de Noorderhaaks) de NUN en de zuidwestkust van Texel. Erosie van zuidwest Texel wordt veroorzaakt door grootschalige gradiënten in de brandingstransporten en door getijstromingen. Zowel de bolle vorm van het eiland en de NUN spelen hierin een rol.

Natuurlijke ontwikkelingen

De Noorderhaaks heeft een rol in de ontwikkeling van de NUN. De Noorderhaaks fungeert niet alleen als sedimentbron van de NUN. De landwaartse terugtrekking van de westzijde en de vormverandering naar een wigvorm van de Noorderhaaks hebben de sedimenttoevoer veranderd, waardoor de huidige ontwikkeling van de NUN duidelijk afwijkt van eerdere ontwikkelingen.

Na afsluiting van de Zuiderzee ontwikkelde de NUN zich tot 2000 als langgerekte spitvormige bank. Deze spit verplaatste landwaarts, waardoor de tussenliggende geul Molengat sediment uit de kustzone afvoerde. Dit droeg bij aan de structurele erosie. De NUN bereikte een maximale lengte rond het jaar 2000 waarna de noordelijke punt landwaarts verplaatste en rond 2015 verheelde met de kust van Texel. Het diepere deel van het kustprofiel nam hier in hoogte toe (tot ongeveer NAP-5 m) maar erosie van het ondiepe deel ging onverminderd door. Golven erodeerden de kustzone en getijstromingen voerden het sediment kustlangs af.

Een analyse van de maatgevende processen laat zien dat erosie van de zuidwestkust van Texel gedreven wordt door verschillende processen. Ten zuiden van raai 800 is het Molengat maatgevend. Vanaf Raai 900 in noordelijke richting zijn gradiënten in de brandingstransporten maatgevend; hierdoor vindt er vooral verlies in de ondiepe kustzone plaats. Golven spelen hier een belangrijke rol in het eroderen van het sediment, dat vervolgens door de golf- en getijstromingen kustlangs afgevoerd kan worden. Sedimentaccumulatie door getijstromingen in de voorliggende NUN zorgt ervoor dat er zandtoevoer terug naar de kust beperkt is, waardoor er een structureel zandverlies optreedt. Vanaf 2000 vindt sediment accumulatie vooral plaats in een groot opbouwend ebschild (tussen raai 800 en 900), waardoor het noordelijke deel van de NUN niet langer behouden kan blijven en langzaam in hoogte en omvang afneemt. Ten zuiden van dit ebschild domineert het Molengat de kusterosie. Geulopvulling en de vorming van flauwe geulwanden zorgt voor een sterke terugtrekking van de kustlijn van De Hors.

Toekomstige ontwikkelingen en rol van suppleties

Het is waarschijnlijk dat het opbouwende ebschild in de toekomst, op een termijn van 10 jaar, een belangrijke rol gaat spelen in de kustlijn ontwikkeling. Bij aanlanding kan deze zandplaat voor lange tijd de kustlijn voeden. Grootschalige veranderingen in zowel Noorderhaaks, Molengat en NUN zijn mogelijk. Beïnvloeding van deze processen door middel van een systeemsuppletie lijkt niet wenselijk vanwege mogelijke onverwachte effecten. Tot aanlanding van het ebschild zal de kustlijnerosie nog wel onverminderd doorgaan. Bij voortzetting van het huidige suppletiebeleid zullen hier frequent terugkerende suppleties moeten worden uitgevoerd.

Systeemsuppleties zouden wel uitgevoerd kunnen worden ten noorden van raai 900. Hier zullen de grootschalige processen niet rechtstreeks worden beïnvloed. Het uitvoeren van een systeemsuppletie op het noordelijke deel van de NUN vergroot de zandvoorraad, maar zal waarschijnlijk ook snel in het systeem worden opgenomen. De hoogte zal snel afnemen waardoor de golf afscherpende werking verdwijnt. Het lijkt niet waarschijnlijk dat zo'n suppletie direct bijdraagt aan het behoud van de kustlijn. Zandtoevoer door de huidige verhelving van de NUN geeft vooral een sediment accumulatie in het diepere deel van het profiel, terwijl de kusterosie onverminderd doorgaat. Het aanbrengen van een "zandmotorachtige" suppletie direct langs de kust zou een

mogelijke oplossing kunnen geven. Met behulp van deze suppletie kunnen de gradiënten in de brandingstransporten worden gestuurd. Het ondiepe platform (tussen raai 1000 en 1200) is hiervoor een geschikte locatie. Deze suppletie zal zich kustlangs, in noordelijke en zuidelijke richting verspreiden, waardoor de kusterosie voor lange tijd kan worden gemitigeerd.

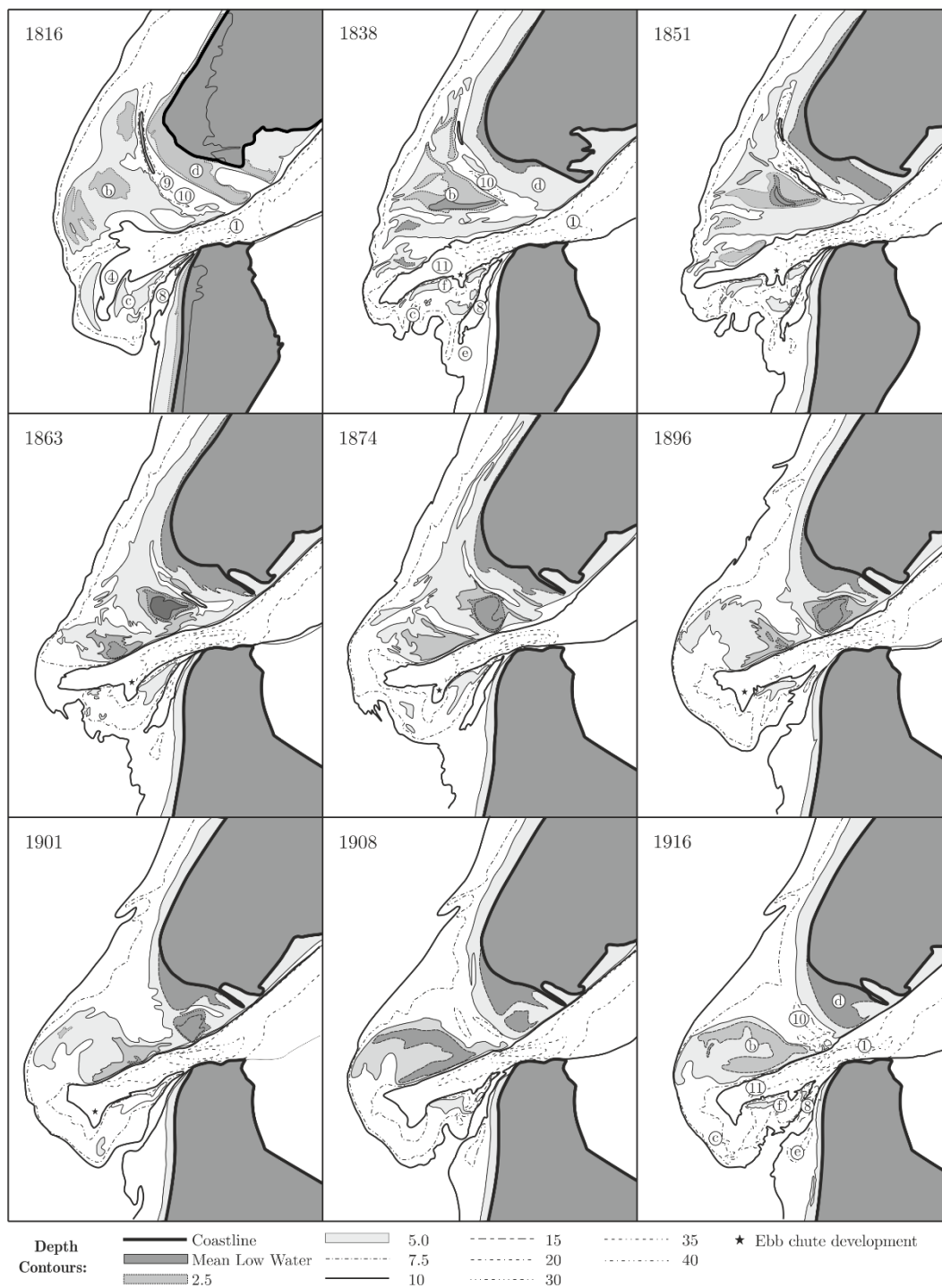
Een grote onzekerheid in morfologische ontwikkeling overheerst ten zuiden van het ebschild. Op korte termijn (jaren) zal het huidige Molengat zeker in omvang en volume blijven afnemen. Dit gaat gepaard met kustlijnerosie van De Hors. Het is a priori niet te voorspellen wat de ontwikkeling van het Molengat op langere termijn gaat worden. De verdere ontwikkeling van Noorderhaaks speelt hier een belangrijke rol. Monitoring en analyse blijft hier essentieel.

7 Referenties

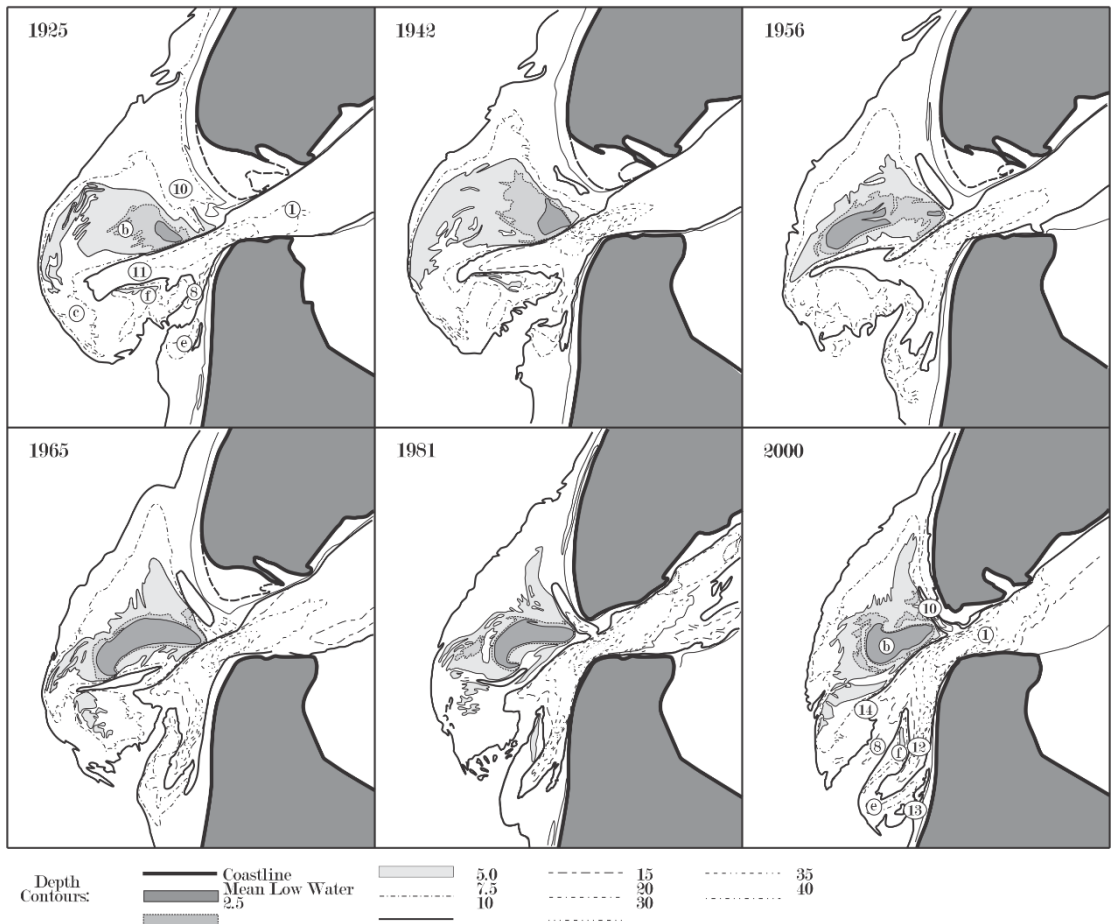
- Cleveringa, J., 2001. Zand voor zuidwest Texel. Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel. Rapport RIKZ/OS/2001/ 031. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ.
- De Ruig, J.H.M., 1998. Coastline management in The Netherlands: human use versus natural dynamics. *Journal of Coastal Conservation*, 4 (2): 127-134.
- Elias, E.P.L., 2020. Systeemsuppleties op Eilandkoppen. Synthese, Rapport 11205236-005-ZKS-0009, Deltares Delft, 43p.
- Elias E.P.L., Oost, A.P., 2021. Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Een conceptueel model. Rapport Deltares 11205236-003-ZKS-0005, 130 p.
- Elias, E.P.L., Pearson, S., Van der Spek, A.J.F., 2020. Understanding the morphological processes at Ameland Inlet Kustgenese 2.0 synthesis of the tidal inlet research. Rapport 1220339-008-ZKS-008, Deltares, Delft, 82 pp.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F, 2020. Systeemsuppleties op eilandkoppen. Rekenontwerpen en Morfologische modellering. Rapport 11205236-005-ZKS-0003, Deltares Delft, 43p.
- Elias, E.P.L., Stive, M.J.F., Bonekamp, J.G., Cleveringa, J., 2003. Tidal inlet dynamics in response to human intervention. *Coastal Engineering Journal* 45 (4), 629-658.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2006. Long-term morphodynamic evolution of Texel Inlet and its ebb-tidal delta (The Netherlands). *Marine Geology* 225, 5-21.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., 2020. Morfologische ontwikkeling van De Hors – Texel, Rapport 11204540-000-ZKS-0007, Deltares Delft, 59 p.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2017. Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. *Netherlands Journal of Geosciences* 96 (4), 293–317.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment-bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology* 415, 105956.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson, S, 2021a. Systeemsuppleties op Eilandkoppen Modellering suppletievarianten Texel en Ameland, Rapport 11205236-005-ZKS-0006, Deltares, Delft, 202 p.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson., 2021b. Systeemsuppleties op Eilandkoppen. Synthese, Rapport 11205236-005-ZKS-0009, Deltares Delft, 43p.
- Hillen, R. & de Haan, Tj., 1993. Development and implementation of the coastal defense policy for the Netherlands. In: Hillen, R. & Verhagen, H.J. (eds.), *Coastlines of the southern North Sea*, p. 118-201. American Society of Civil Engineers (New York, NY).
- Hillen, R. & Roelse, P., 1995. Dynamic Preservation of the Coastline in the Netherlands. *Journal of Coastal Conservation*, 1 (1): 17-28
- Oost, A, Cleveringa, J., Taal, M., 2019. Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019. Rapport 11203669-000-ZKS-0006, Deltares, Delft, 104 p.

- Rakhorst, H.D., 1983. Plan afsluiting Molengat; een globale beschouwing. Notitie WWK-83.H230. Rijkswaterstaat, directie waterhuishouding en waterbeweging. District kust en zee. Adviesdienst Hoorn, 21 p.
- Rakhorst, H.D., 1984. Werking strandhoofden Noord-Holland, Texel, Vlieland, Rijkswaterstaat, adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-84.H007, 15 pag., 16 bijlagen.
- Rijkswaterstaat, 1990. A new coastal defense policy for the Netherlands. Rijkswaterstaat, Tidal Waters Division (The Hague): 100 pp.
- Schoorl, H., 1973. Zeshonderd Jaar Water en Land (in Dutch). Wolters-Noordhoff, Groningen, 534 pp.
- Schoorl, H., 1999. De convexe kustboog Texel-Vlieland-Terschelling: bijdragen tot de kennis van het westelijk Waddengebied en de eilanden Texel, Vlieland en Terschelling: 1. Het westelijk Waddengebied en het eiland Texel tot circa 1550 (in Dutch). Pirola (Schoorl): 187 pp.
- Van der Spek, A.J.F. and Elias, E.P.L., 2021. Half a century of morphological change in the Haringvliet and Grevelingen ebb-tidal deltas (SW Netherlands) - Impacts of large-scale engineering 1964–2015. *Marine Geology* 432 (2021) 106404
- Van Heteren, S., Oost, A. P., de Boer, P.L., van der Spek, A.J.F., Elias, E.P.L., 2006. Island-terminus evolution as a function of changing ebb-tidal delta configuration: Texel, The Netherlands, *Marine Geology* 235, (1): 19-23.
- Verhagen, H. J. en van Rossum, H. (1990). Strandhoofden en paalrijen: evaluatie van hun werking. Min V&W, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.

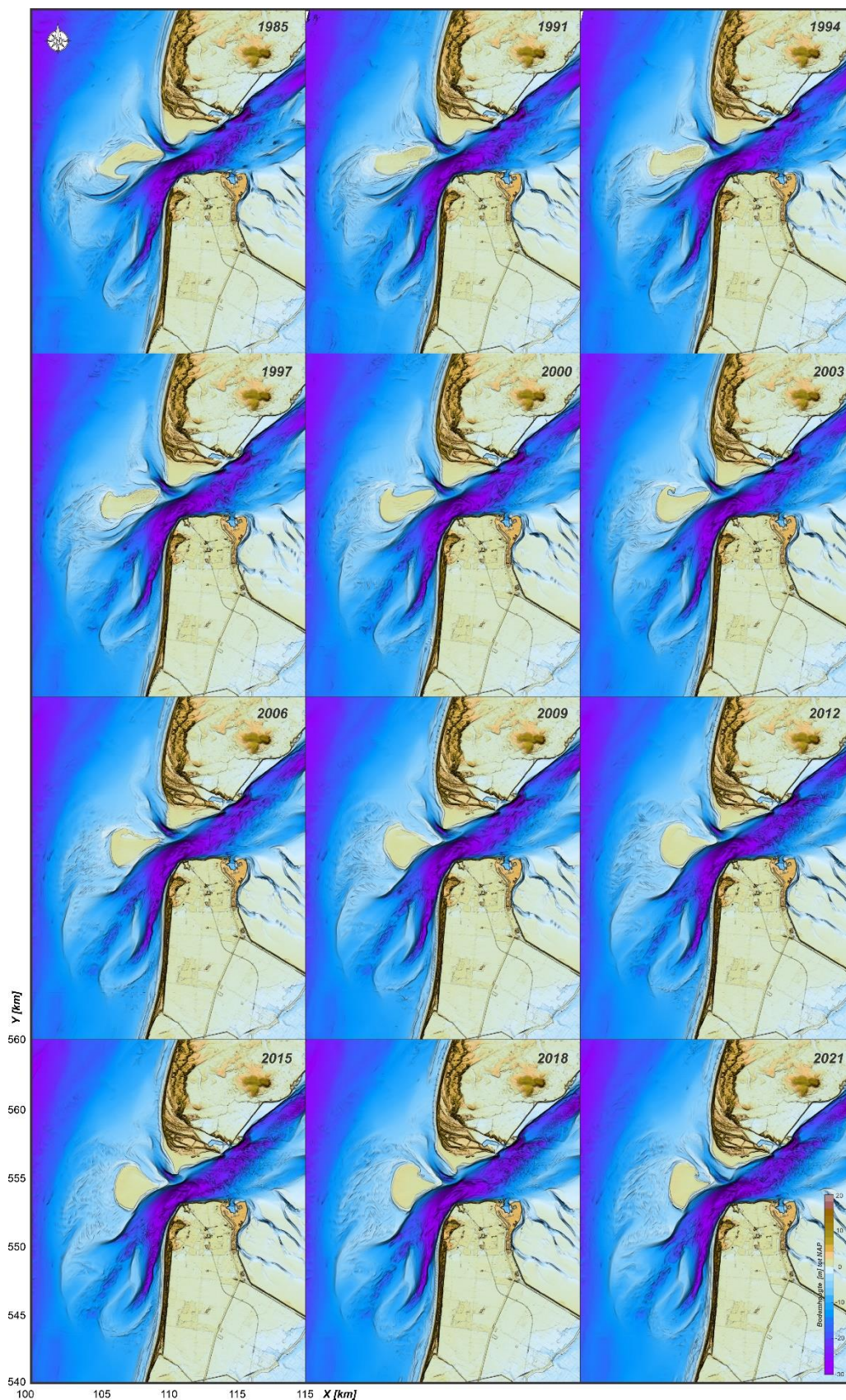
A Aanvullende bodemkaarten



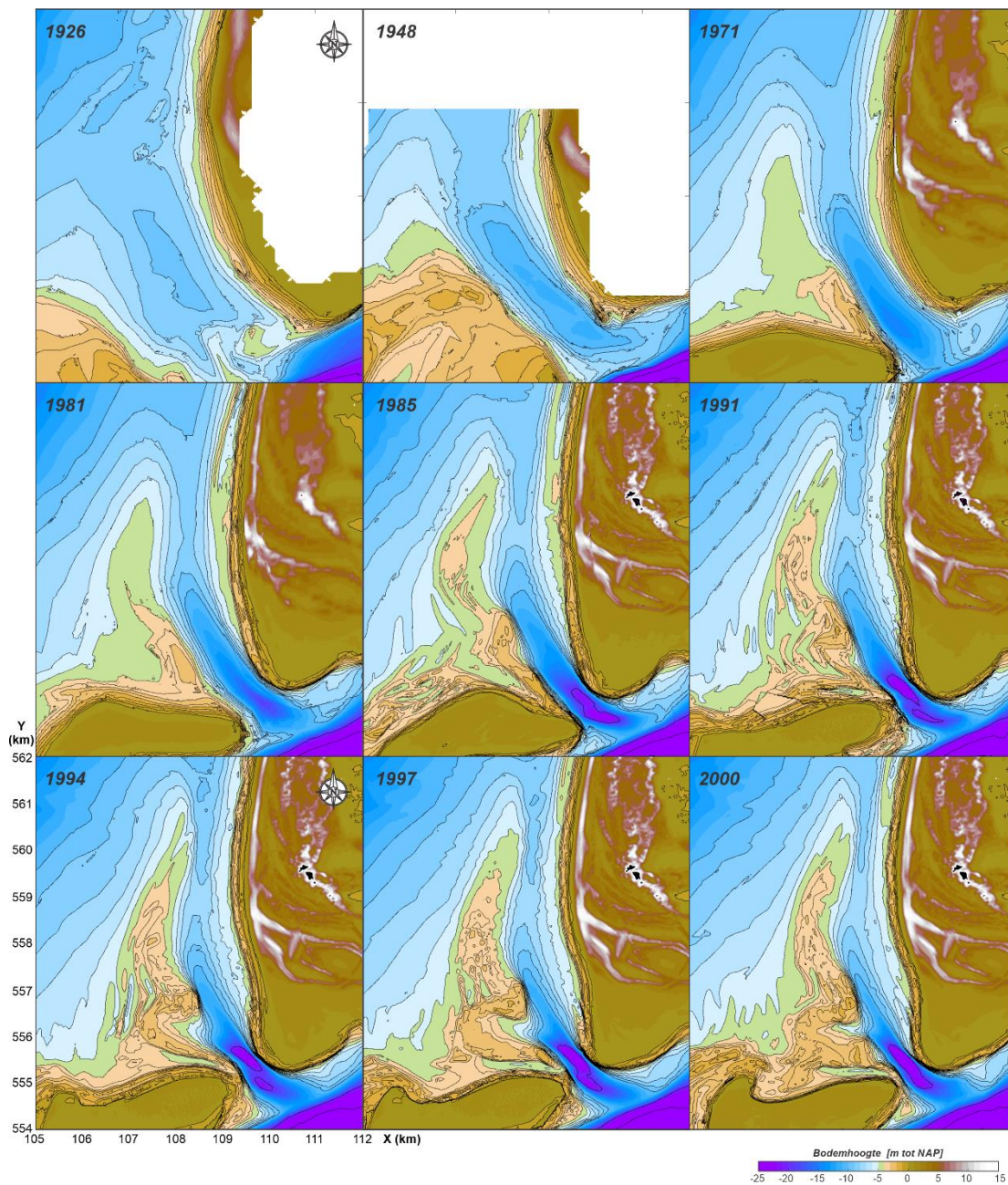
Figuur A- 1: Een overzicht van de ontwikkeling van de buitendelta van het Zeegat van Texel tussen 1816 tot 1916 (Bron: Elias en Van der Spek, 2006). Geulen: (1). Marsdiep, (4) Lands Diep, (8) Schulpengat, (9) Noordergat, (10) Molengat, (11) Westgat, Platen: (b) Noorderhaaks, (c) Zuiderhaaks, (d) De Hors, (e) Franse Bankje, (f) Bollen van Kijkduin..



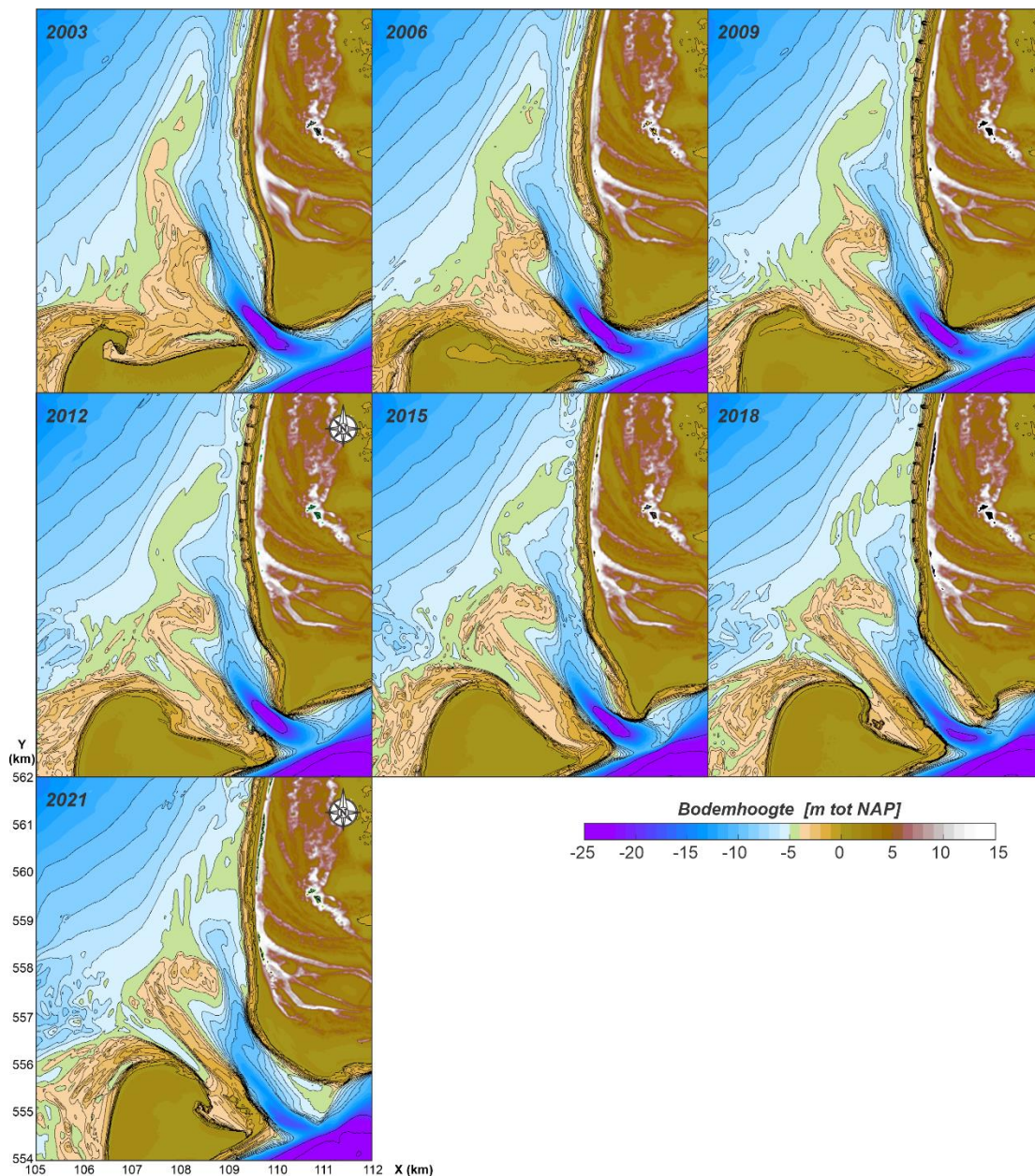
Figuur A- 2: Ontwikkeling van de buitendelta tussen 1925 A.D. en 2000 A.D. Bron: Elias en van der Spek (2006). Geulen: (1). Marsdiep, (4) Lands Diep, (8) Schulpengat, (9) Noordergat, (10) Molengat, (11) Westgat, Platen: (b) Noorderhaaks, (c) Zuiderhaaks, (d) De Hors, (e) Franse Bankje, (f) Bollen van Kijkduin..



Figuur A- 3: Overzicht van de Vaklodingen over de periode 1986-2018. De Vaklodingen beslaan het natte deel, het droge strand en de eerste duinenrij(en). Het overige deel van het vasteland is ingevuld met het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) 2017.

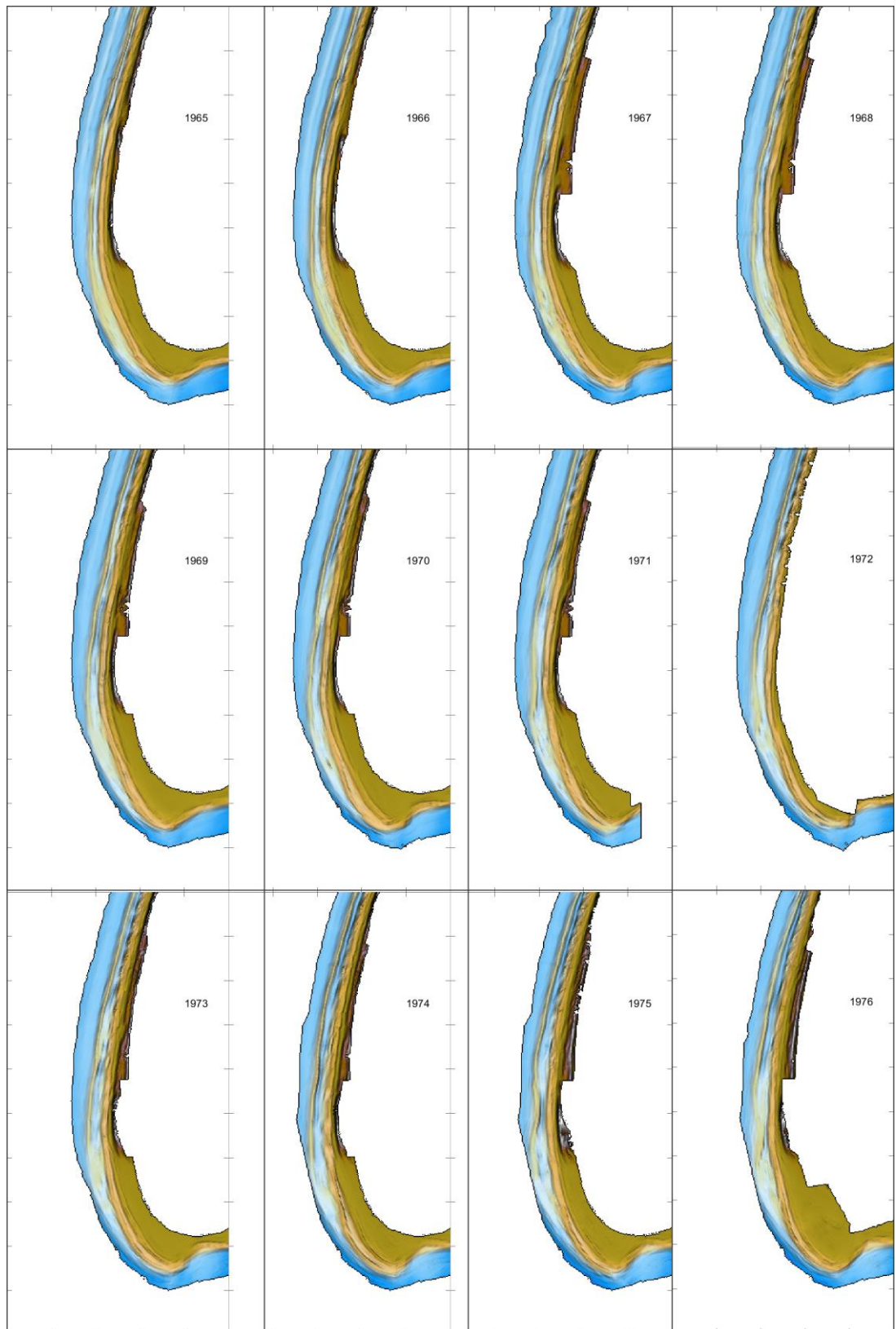


Figuur A- 4: Detailbeeld van de ontwikkeling van de NUN tussen 1926 en 2000 op basis van de vlakdingen.

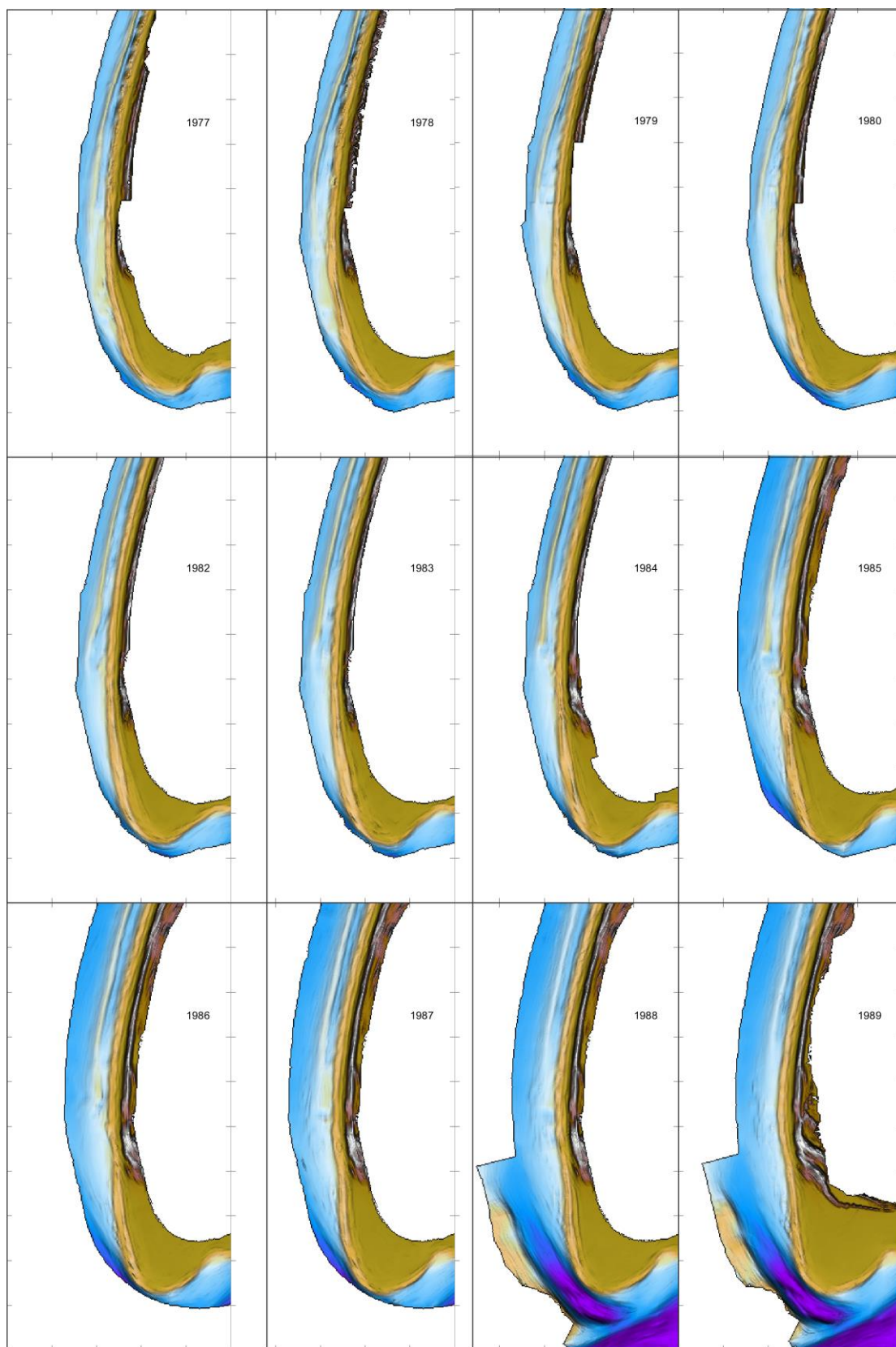


Figuur A- 5: Detailbeeld van de ontwikkeling van de NUN tussen 2003 en 2021 op basis van de vaklodingen. In de bodems 2009, 2012 en 2018 zijn de strandhoofden duidelijk zichtbaar in de bodemligging. Deze strandhoofden zijn tussen 1959 en 1987 aangelegd.

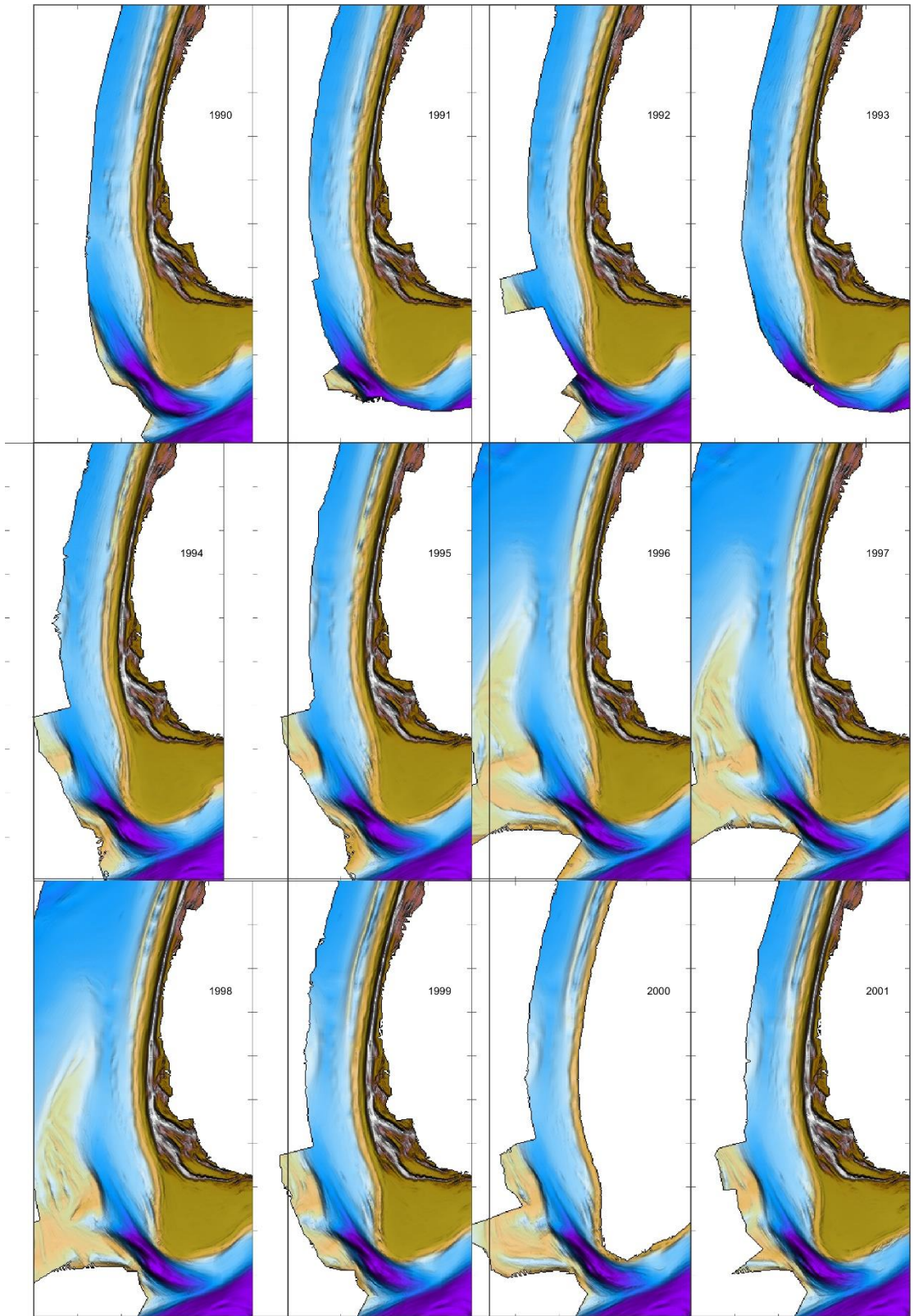
B Overzicht van Jarkus grids



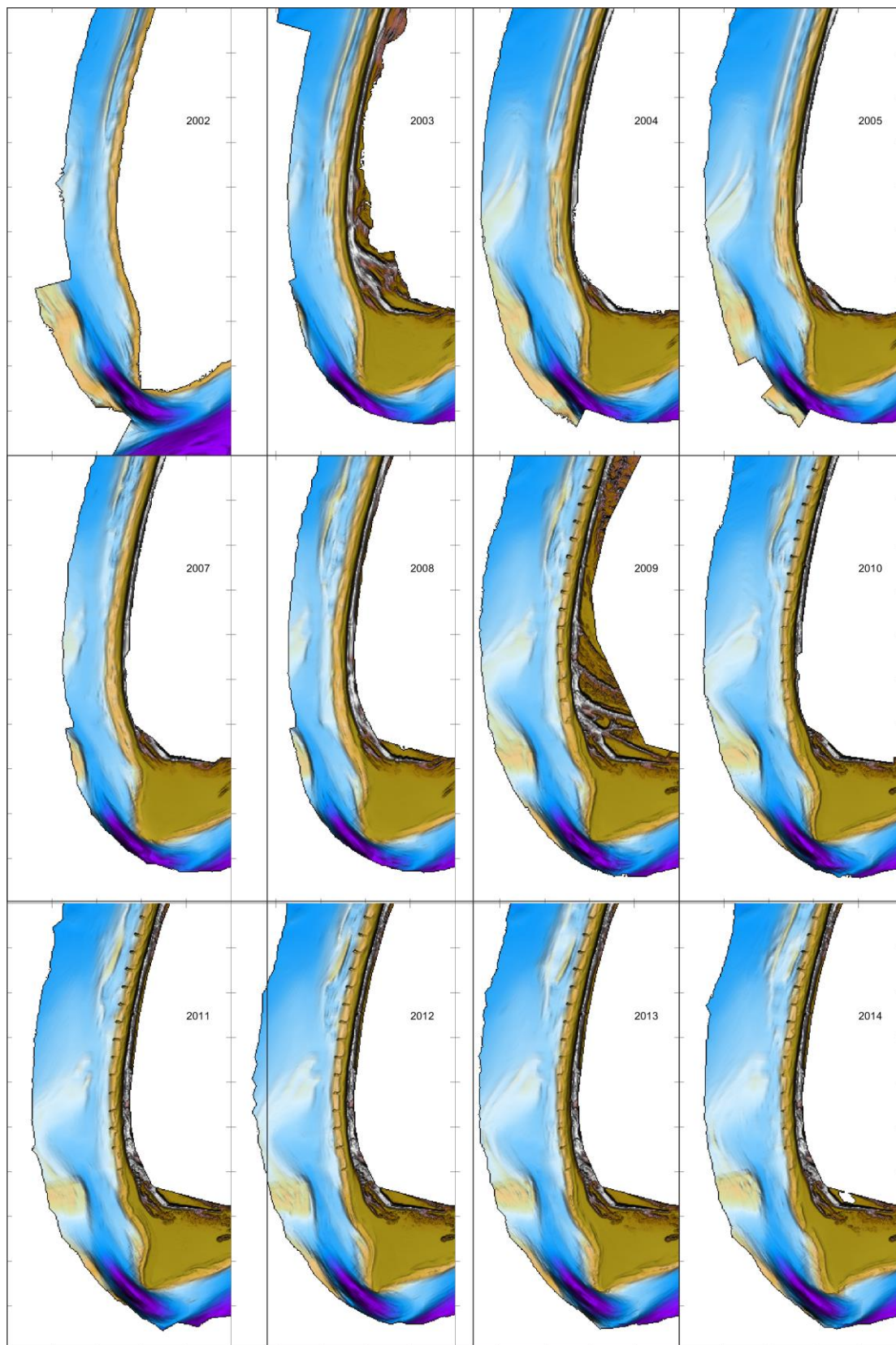
Figuur B- 1: Jarkus grids over de periode 1965-1976



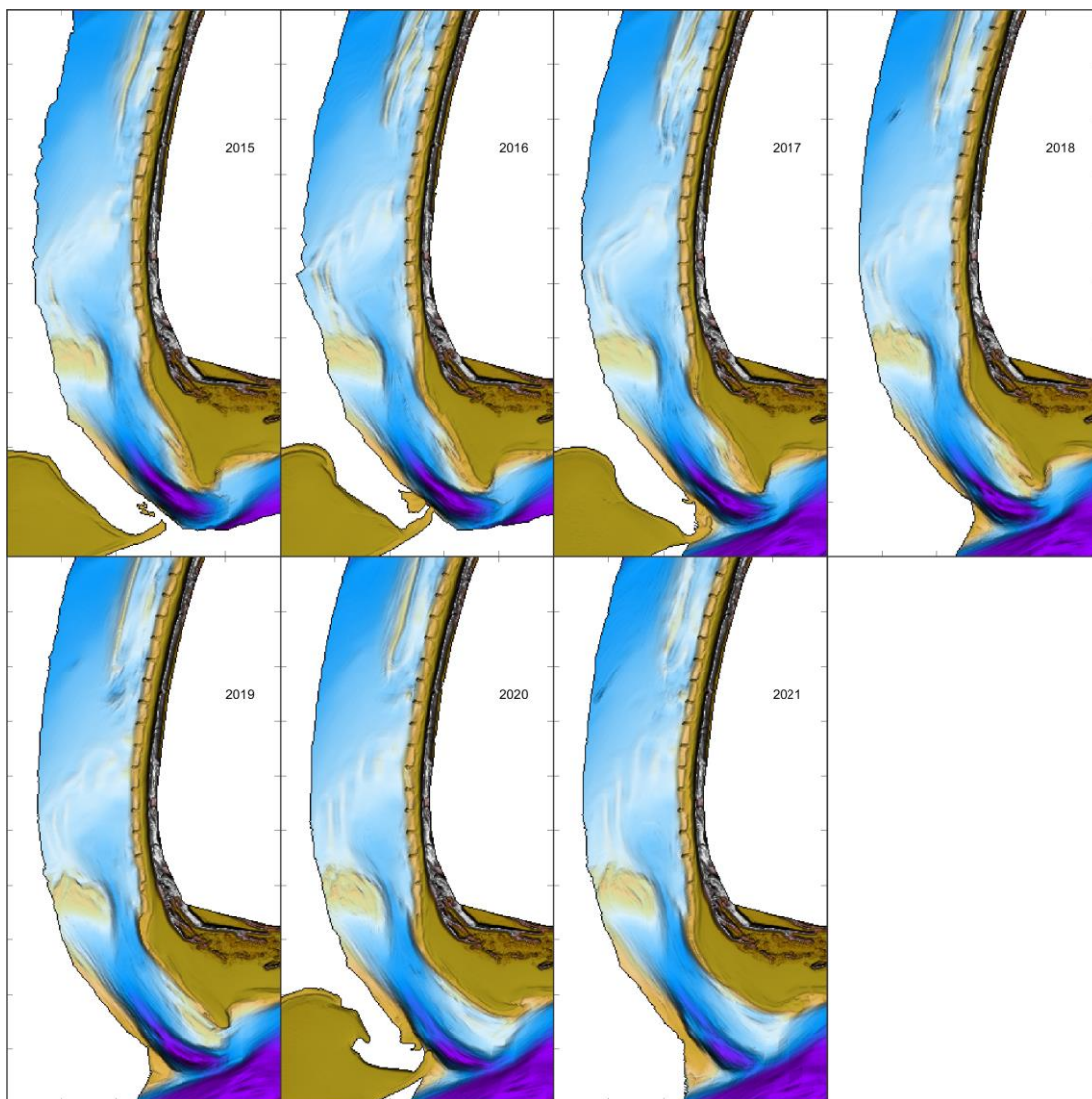
Figuur B- 2: Jarkus grids over de periode 1977-1989



Figuur B- 3: Jarkus grids over de periode 1990-2001

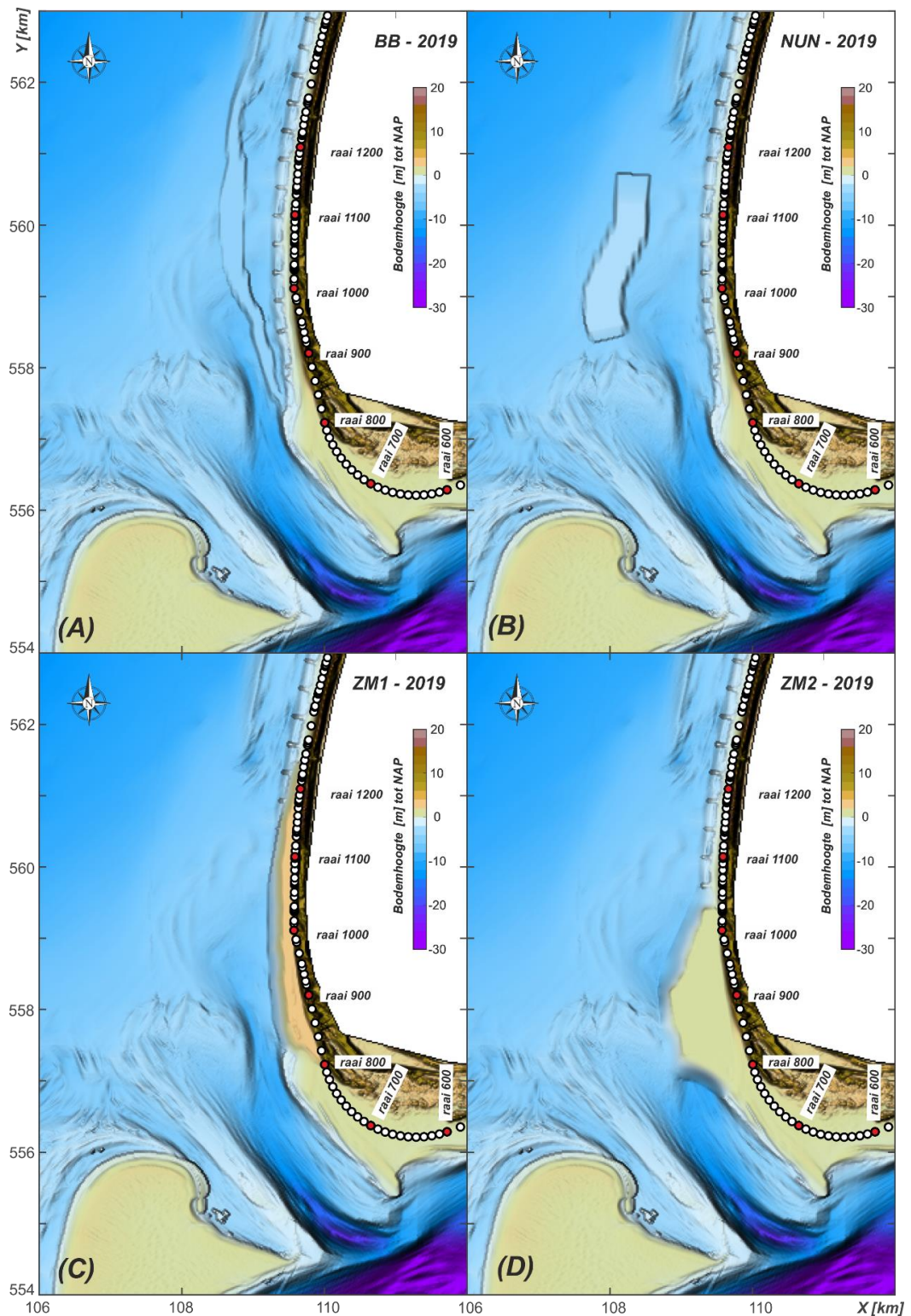


Figuur B- 4: Jarkus grids over de periode 2002-2014

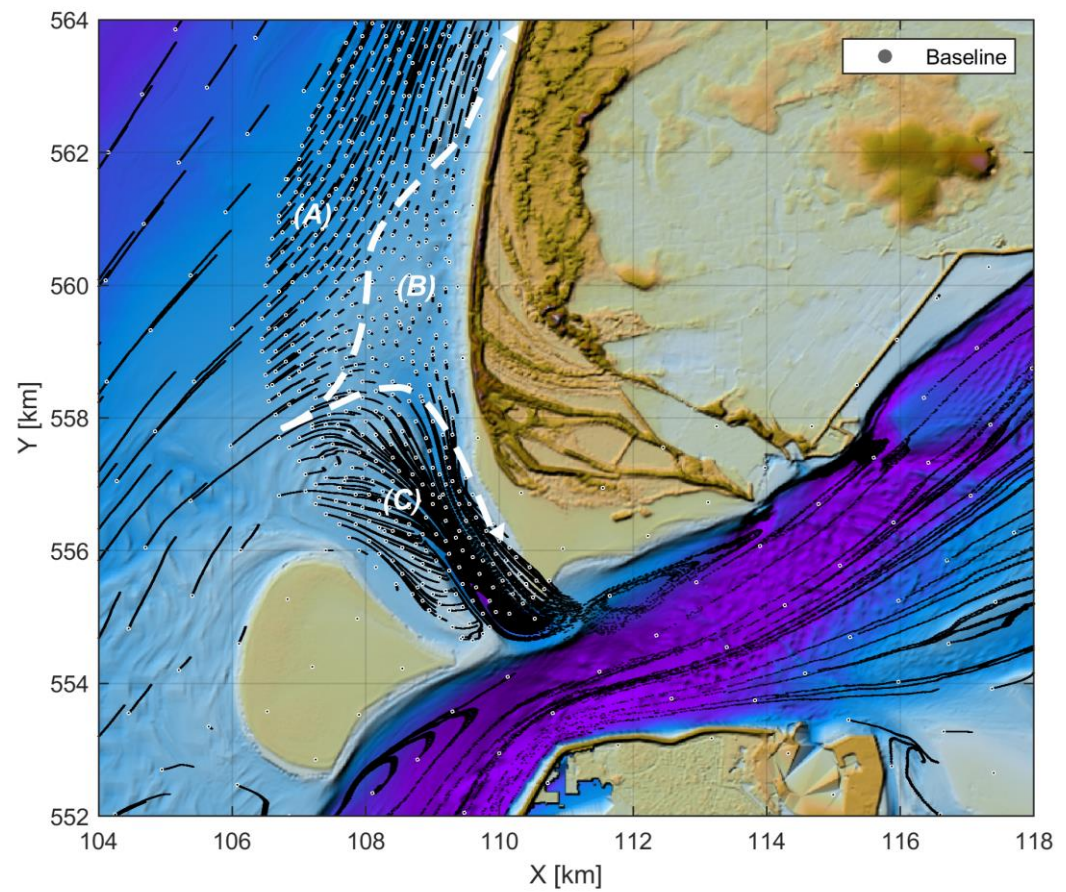
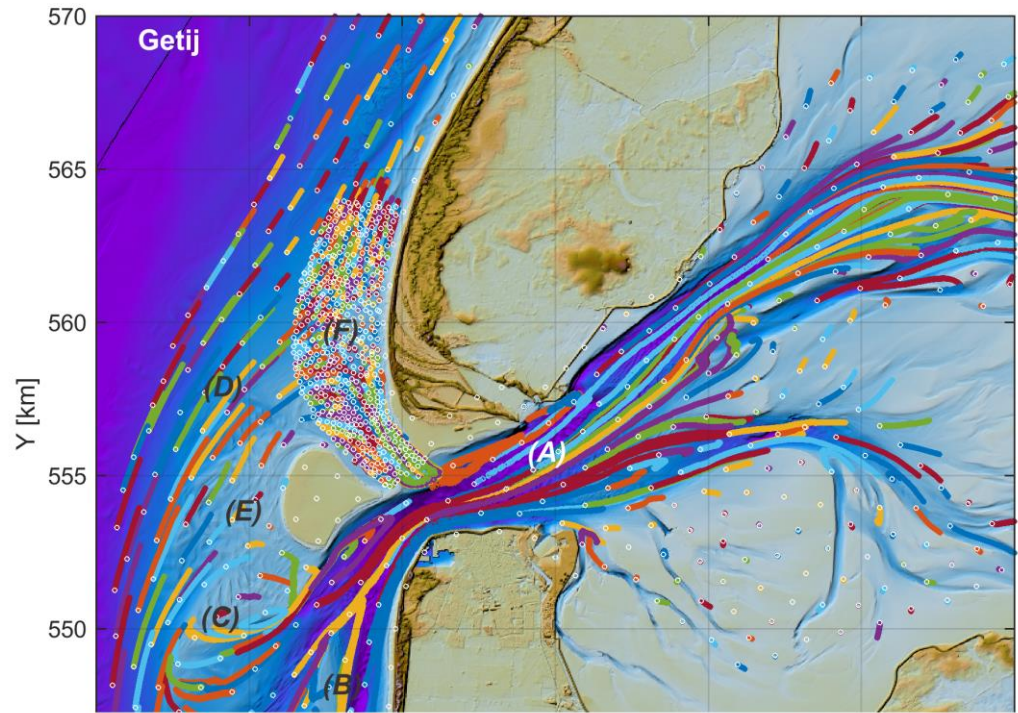


Figuur B- 5: Jarkus grids over de periode 2015-2021

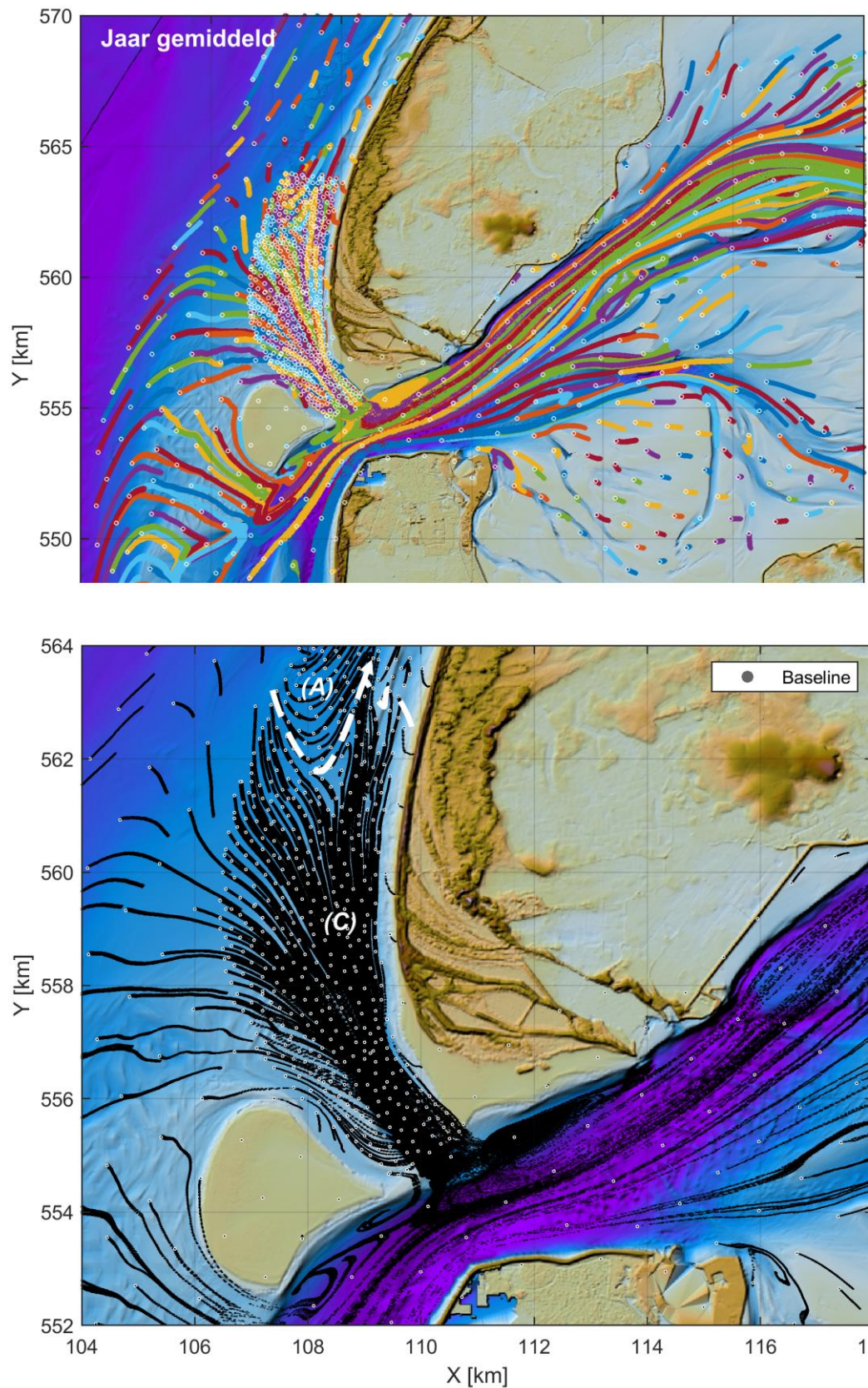
C Aanvullende figuren synthese



Figuur C- 1: De vier suppletievarianten voor Texel Zuidwest samengevat in 1 figuur: (A) suppletieontwerp Brekerbank (BB), (B) suppletieontwerp Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN), (C): suppletieontwerp Zandmotor 1 (ZM I) en (D): suppletieontwerp Zandmotor 2 (ZM II).



Figuur C- 2: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor gemiddelde getij-gedreven transporten voor het gehele zeegat (boven) en voor Texel Zuidwest in detail (onder).



Figuur C- 3: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor de T0 situatie voor de jaarlijks gemiddelde condities voor het gehele zeegat (boven) en voor Texel Zuidwest in detail (onder).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl